БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА
Выпуск 392

Е. Л. МАРШАК, Р. Б. УМАНЦЕВ

СХЕМЫ ОБМОТОК МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Издание 2–е, переработанное и дополненное

"Энергия" Москва 1974

Rev. 03   26 Feb 2024

Схемы обмоток машин переменного тока. Изд. 2–е, перераб. и дополн., М., "Энергия", 1974. (Библиотека электромонтера. Выпуск 392).

Рассматриваются схемы обмоток синхронных и асинхронных электрических машин. Приводятся классификация, электрические параметры и характеристики схем обмоток статоров и роторов. Освещаются условия их выполнимости. Даются примеры составления развернутых и упрощенных схем обмоток. Брошюра рассчитана на электромонтеров по эксплуатации, электрообмотчиков и мастеров по ремонту электрических машин.

Предисловие.

В решениях XXIV съезда КПСС указаны пути дальнейшего развития народного хозяйства нашей страны. Ведущую роль в создании материально–технической базы коммунизма играет электрификация, призванная повысить энерговооруженность, обеспечить подъем и технический прогресс всех отраслей народного хозяйства. Непрерывно возрастает количество электрических машин, выпускаемых нашими электромашиностроительными заводами и установленных в промышленности, на электростанциях, в сельском хозяйстве, транспорте, а также в бытовых установках. С каждым годом увеличивается количество электрических машин, нуждающихся в ремонте, совершенствуется технология ремонта. В настоящее время в год ремонтируется свыше 3 миллионов асинхронных трехфазных электродвигателей мощностью до 100 *кВт*, являющихся самыми распространенными электрическими машинами, потребляющими до 40% всей электроэнергии, вырабатываемой в нашей стране. При ремонте применяются новые прогрессивные электроизоляционные материалы и обмоточные провода с теплостойкой и электрически прочной изоляцией. Основным, наиболее часто встречающимся видом ремонта электрических машин является замена их обмоток. В связи с интенсификацией производственных процессов при ремонте часто возникает необходимость изменить заводские параметры обмотки, модернизировать ее тип и схему с целью повышения мощности электрической машины. При этом должно быть выбрано наиболее оптимальное решение, обеспечивающее высокое качество обмотки, наиболее простой и экономный способ заготовки ее элементов и укладки их в машину. В некоторых случаях к обмоткам и их схемам предъявляются дополнительные требования, исходящие из назначения и условий работы электрической машины. От степени квалификации ремонтного персонала, от его знания и умения составить оптимальную схему обмотки во многом зависит качество ремонта и эксплуатационная надежность электрической машины. Предлагаемая брошюра должна оказать помощь персоналу, занятому ремонтом электрооборудования, в составлении схем обмоток электрических машин. Авторы будут признательны тем, кто сообщит свои замечания и пожелания по данной брошюре.
Замечания, отзывы и пожелания просим направлять по адресу: 113114, Москва, М–114, Шлюзовая набережная, 10, издательство "Энергия".

1. Общие сведения.

Исходным элементом, из которого составляется схема обмотки, является катушка, состоящая из одного или нескольких последовательно соединенных витков. Витком называется элемент, состоящий из двух последовательно соединенных проводников, расположенных под соседними разноименными полюсами. Проводники, образующие виток, могут быть подразделены на несколько параллельных проводов. Подразделение витка необходимо как из технологического удобства намотки во избежание применения грубого провода большого сечения, так и из теоретических соображений (для уменьшения дополнительных потерь в меди обмотки, которые при переменном токе существенно снижаются в пучке параллельных изолированных друг от друга проводников). Части катушки, лежащие в пазах активной стали, называются пазовыми или активными частями катушки, так как они пронизываются магнитным потоком и непосредственно участвуют в создании *эдс* машины. Проводники, лежащие вне пазовой части и служащие для соединения активных частей катушки, называются лобовыми частями катушки. Катушка, помимо определенного числа витков, характеризуется также своим шагом, т. е. числом пазовых делений, заключенных между центрами пазов, в которые закладывают стороны катушки. Шаг катушки $y_{\text{П}}$ называют диаметральным, если он равен полюсному делению. В этом случае, например, для статора:

$$y_{\Pi} = \tau = \frac{Z_1}{2p}$$

где Z_1 – число пазов статора; $2p$ – число полюсов обмотки. Полюсное деление представляет собой длину части окружности расточки статора, приходящейся на долю полюса, и может быть определено по формуле:

$$\tau = \frac{\pi \times D_1}{2p}$$

где D_1 – диаметр расточки статора, *мм*. Полюсное деление может быть также выражено в относительных единицах, т. е. числом пазовых делений, заключенных между осями соседних полюсов, как это следует из формулы для диаметрального шага обмотки. В двухполюсной электрической машине центральный угол, соответствующий полюсному делению, составляет 180°, в четырехполюсной 90°, в шестиполюсной 60° геометрических градусов и т. д. При составлении схем обмоток и вообще в теории электрических машин принято при любом числе полюсов машины считать угол, соответствующий полюсному делению, равным 180° электрических градусов. Тогда число электрических градусов в окружности расточки электрической машины с любым числом полюсов будет равно 180° × $2p$. Шаг катушки может быть несколько меньше диаметрального. В этом случае его называют укороченным. Укорочение шага катушки (обмотки) характеризуется коэффициентом укорочения.

$$K\text{у} = \frac{y_{\Pi 1}}{\tau}$$

где $y_{\Pi 1}$ – укороченный шаг обмотки. Для примера возьмем статор электрической машины имеющий 60 пазов. Для образования четырехполюсной обмотки полюсное деление τ, а также диаметральный шаг $y_{\Pi 1}$ равны 15, т. е. если одна сторона катушки закладывается в паз статора, который условно обозначается № 1, то вторая сторона этой катушки должна быть заложена в паз № (1 + 15) = 16. Если же вторую сторону катушки заложить в паз № 14, т. е. применить укороченный шаг, равный 13, то укорочение: $K_{\text{у}}$ = 13/15 = 0,87, т. е. шаг составит 87% диаметрального. Несмотря на то, что укорочение шага уменьшает *эдс* индуктируемую в катушке, так как обе стороны витка при укороченном шаге не могут одновременно находиться под центрами соседних полюсов, оно широко применяется в двухслойных обмотках электрических машин переменного тока. Помимо экономии меди на длине лобовых частей, сокращение шага обмотки улучшает электрические свойства машины путем снижения действия так называемых высших гармонических, которые неблагоприятно сказываются на форме поля *эдс* и увеличивают дополнительные потери в меди обмотки. Укорочение шага обмотки также облегчает укладку катушек в пазы. В различных типах обмотки, исходя из условий электромагнитного расчета и технологических соображений, применяется укорочение шага обычно 0,87–0,74, реже до 0,66, а в отдельных случаях до 0,5.

Характерным показателем каждой обмотки электрической машины переменного тока является число пазов на полюс и фазу q. Оно показывает сколько катушечных сторон каждой фазы приходится на полюс обмотки. Поскольку катушечные стороны одной фазы, лежащие под двумя соседними полюсами обмотки, образуют катушечную группу, то число q показывает, из скольких катушек состоят катушечные группы данной обмотки. Таким образом, для статора:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2p \times m}$$

где m – число фаз обмотки.

Для рассматриваемых нами трехфазных обмоток: $q_1 = Z_1/(6 \times p)$. Для вышеприведенного примера, где $Z_1 = 60$, $2p = 4$, $q_1 = Z_1/(6 \times p) = 5$. Если же статор этой машины использовать для изготовления восьмиполюсной машины, то $q_1 = 60/(6 \times 4) = 2{,}5$, т. е. число пазов на полюс и фазу будет дробным. Дробное q_1, так же как и целое, определяет число катушек в каждой катушечной группе.

Как это делается мы увидим ниже при рассмотрении обмоток с дробным q_1. Из условий симметрии обмотки следует, что все три ее фазы должны иметь одинаковое число катушек, симметрично расположенных по окружности машины. Именно в этом случае суммарные *эдс* фаз обмотки будут равны по величине и сдвинуты на 120° или 240°. Катушки должны быть соединены в катушечные группы, а последние – в фазы так, чтобы обеспечить необходимое число полюсов обмотки и правильное их чередование. Катушки внутри катушечной группы соединяют всегда последовательно, а катушечные группы в фазе могут быть соединены последовательно, параллельно или смешанно (последовательно–параллельно). Все эти способы соединения катушечных групп показаны на рис. 1. Основным правилом при пересоединении последовательной обмотки в параллельную или смешанную является сохранение направления тока в катушечных группах таким же, как это имело бы место при последовательном соединении, в котором направление токов определяется чередованием полюсности обмотки.

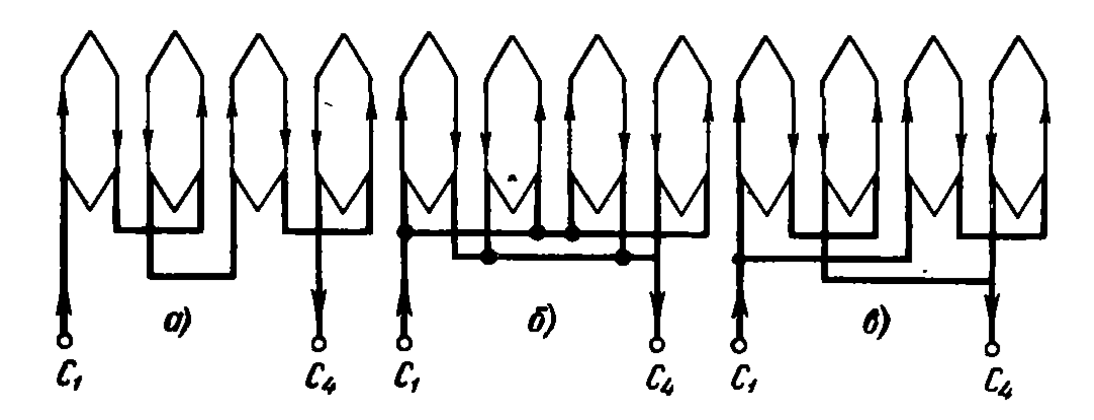


Рис. 1. Соединение катушечных групп.
а – последовательное; *б* – параллельное; *в* – смешанное.

Подробнее о параллельных соединениях в обмотках будет сказано ниже при непосредственном рассмотрении различных типов схем. И наконец, на схеме требуется указать способ соединения фаз обмотки – в звезду или в треугольник. Каким из этих способов должны быть соединены фазы, определяют расчетом обмотки. Для одного и того же номинального напряжения, для различных машин могут применяться как один, так и другой способ. Само соединение фаз может быть выполнено как внутри машины, глухо, так и при помощи перемычек на специальном щитке, вынесенном на корпус машины. Последний способ удобен тем, что позволяет более четко проводить профилактические испытания обмотки в процессе эксплуатации, так как начала и концы всех фаз могут быть свободно присоединены к испытательной аппаратуре. Электрические машины часто бывают пригодны для работы на любом из двух номинальных напряжений, находящихся в соотношении 1 : 1,73, например 220 и 380, 127 и 220 или реже 6000 и 10500 *в*; тогда при меньшем из этих двух напряжений его фазы должны быть соединены в треугольник, а при большем – в звезду. На рис. 2 показаны принципиальные схемы соединения фаз обмотки и соответствующие этим соединениям переключения, производимые на внешнем щитке для асинхронного двигателя на номинальные напряжения 220/380 *в*. Обмотки электрических машин переменного тока подразделяют на петлевые и волновые.

Схемы петлевых обмоток, как правило, используют для статоров синхронных и асинхронных машин, схемы волновых обмоток – для фазных роторов асинхронных двигателей. В отдельных случаях не исключено применение волновых схем в статорах крупных машин (чаще всего в гидрогенераторах) и петлевых обмоток в фазных роторах асинхронных двигателей малой мощности. Как петлевые, так и волновые обмотки могут быть однослойными и двухслойными.

При однослойной обмотке каждая сторона катушки занимает весь паз; при двухслойной обмотке сторона катушки занимает по высоте только половину паза, т. е. в каждый паз закладывают две стороны катушки, образуются два слоя обмотки. Из сказанного следует, что при однослойной обмотке число катушек равно половинному числу пазов, а при двухслойной – полному числу пазов. Основными недостатками однослойных обмоток по сравнению с двухслойными являются: увеличенный (доходящий до 20%) расход меди; ограниченные возможности построения схемы обмотки с укороченным шагом и с дробным q для наиболее распространенного вида однослойных обмоток – концентрических; более трудоемкая технология изготовления катушек для крупных машин высокого напряжения и их монтажа в машине.

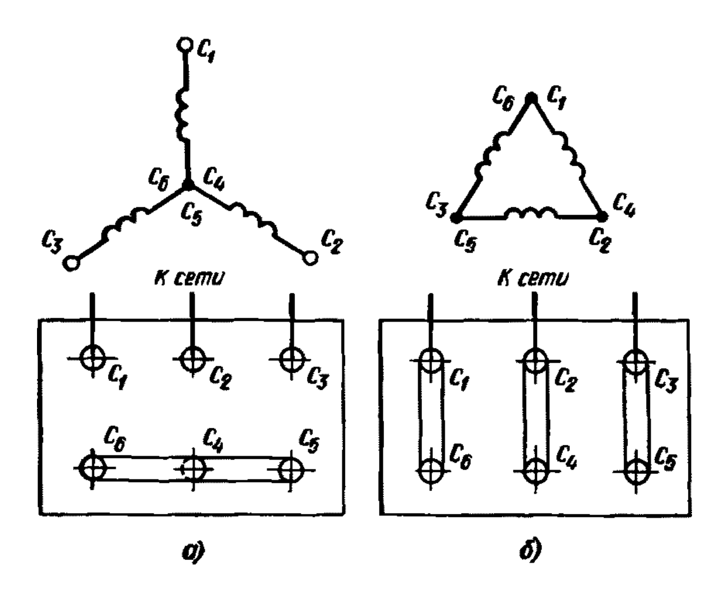


Рис. 2. Соединение фаз обмотки двигателя на 220/380 *в*.
а – в звезду на 380 *в*;
б – в треугольник на 220 *в*.

Перечисленные недостатки однослойных обмоток весьма существенны и сильно ограничивают их применение, в особенности для крупных машин высокого напряжения; с другой стороны, однослойные обмотки позволяют существенно повысить коэффициент заполнения паза медью за счет отсутствия значительного изоляционного слоя в середине паза. Так например, в двухслойных обмотках двигателей высокого напряжения высота этого слоя достигает 7 – 9 *мм*. Независимо от вида и типа, к обмоткам машин переменного тока предъявляют следующие общие требования: фазные напряжения должны быть одинаковыми по величине и сдвинуты друг относительно друга на строго определенный угол, зависящий от числа фаз обмотки. Для трехфазной системы этот угол должен быть равен 120° или 240° электрических градусов; активные и индуктивные сопротивления каждой из фаз должны быть одинаковыми, причем активные сопротивления (по возможности) – наименьшими для уменьшения тепловых потерь в меди обмотки. Параллельные ветви в фазах обмотки, если таковые необходимы по расчету, должны быть идентичными; схема должна обеспечивать наиболее простое и экономичное технологическое решение заготовки элементов обмотки и ее монтажа в пазы статора; схема должна обеспечивать возможность качественного исполнения самой обмотки и ее крепления в статоре. Напряжение, вырабатываемое генераторами переменного тока, должно изменяться по кривой, у которой ни одна из ординат не должна значительно отличаться от соответствующей ординаты основной синусоиды.

Допустимая степень отклонения определена ГОСТ183–66 (Машины электрические. Общие технические требования). В асинхронных двигателях синусоидальное изменение вращающегося магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, обеспечивает спокойную работу машины, уменьшает потери и следовательно нагрев двигателя. Наоборот, значительное отклонение кривой поля от синусоиды может привести к непроизвольному торможению короткозамкнутого асинхронного двигателя при пуске и другим нежелательным явлениям.
Перед тем, как перейти непосредственно к рассмотрению схем обмоток, следует обусловить некоторые буквенные обозначения и приемы изображения схем на чертежах. Основной чертеж схемы в условном виде представляет собой развертку окружности статора или ротора на плоскости. Пазы и стороны уложенных в них катушек изображают прямыми линиями. Схемы двухслойных обмоток в пазовой части изображают двумя рядом расположенными линиями – сплошной и пунктирной, причем сплошная линия обозначает сторону катушки, уложенную в верхнюю часть паза, а пунктирная линия – нижнюю сторону катушки, уложенную на дно паза. Нижний и верхний слой лобовых частей изображают соответственно пунктирными и сплошными линиями. Кроме основного, приводятся и другие способы изображения схем (кольцевой, торцевой, упрощенной), пояснения к которым даны в ходе описания этих схем. Стрелки на элементах обмотки, проставленные на некоторых схемах, показывают направление *эдс* или токов в соответствующих элементах обмотки в определенный (один и тот же для всех фаз обмотки) момент времени. Начала и концы фаз обмотки статора по действующему ГОСТ 183–66 обозначаются:

Начало I фазы	С1	Конец I фазы	С4
Начало II фазы	С2	Конец II фазы	С5
Начало III фазы	С3	Конец III фазы	С6

Выводы обмоток ротора:

	При четырех выводах на контактных кольцах	При трех выводах на контактных кольцах
I фаза	Р1	Р1
II фаза	Р2	Р2
III фаза	Р3	Р3
Нулевая точка	0	–

В литературе более ранних годов издания, а также на паспортных табличках электрических машин старых выпусков обозначение выводов дается соответственно: X, Y, Z, U, V, W или $Н_1$, $Н_2$, $Н_3$, $К_1$, $К_2$, $К_3$. Для составления схем трехфазных обмоток статоров электрических машин переменного тока, помимо указания вида обмотки, должны быть даны определяющие ее параметры: Z_1 – число пазов; $2p$ – число полюсов; $у_{П1}$ – шаг обмотки по пазам; a –число параллельных ветвей в фазе; Y (звезда) или △ (треугольник) – способ соединения фаз.

2. Схемы обмоток статоров.

Развернутые схемы однослойных обмоток. Схемы однослойных обмоток представляют интерес для обмотчиков и мастеров главным образом потому, что до настоящего времени в промышленности находится в эксплуатации большое число двигателей старых выпусков отечественного производства и иностранных фирм, имеющих однослойную обмотку, почти все они требуют полной замены обмотки в связи со старением изоляции от длительного срока работы.

Хотя данная брошюра не рассматривает вопрос технологии производства обмоток, но ввиду того, что технологические особенности определенным образом влияют на построение некоторых схем однослойных обмоток, здесь следует очень коротко отметить различные технологические принципы исполнения таких обмоток. Однослойные обмотки крупных двигателей выполнялись фирмами, как правило, путем протяжки провода, чаще всего литцы или круглого сечения, через вставленные в закрытые или полузакрытые пазы микафолиевые гильзы, т. е. катушка, а иногда и целая катушечная группа была изготовлена одним сплошным проводом без паяных соединений.

При капитальных ремонтах обмоток такого типа в настоящее время упомянутый способ "протяжки" почти не применяется. Сейчас катушки однослойной концентрической обмотки изготовляют в виде так называемых "разрезных" U – образных заготовок, вставляемых с торца в пазы, а на противоположной стороне производят формовку лобовой части и пайку каждого витка в отдельности. Только немногие иностранные фирмы (в частности, Чехословацкая) изготовляют в настоящее время однослойные обмотки, выполненные в виде полностью отформованных замкнутых катушек, укладываемых через шлицы открытых пазов. Способ "разрезных" U – образных заготовок, несмотря на наличие большого числа паяных соединений, предпочтительнее способа "протяжки" по следующим основным положениям: обеспечивается более надежная витковая изоляция; обеспечивается более эффективное заполнение паза медью. Имеется возможность заблаговременной заготовки обмотки с целью выполнения замены устаревшей обмотки в минимальные сроки. На рис. 3 представлена трехфазная схема однослойной концентрической обмотки статора для четырехполюсной машины; число пазов Z_1 = 36; число пазов на полюс и фазу $q_1 = Z_1/(2p \times 3) = 36/(4 \times 3) = 3$. Такая обмотка называется концентрической потому, что катушечная группа, в данном случае образованная из трех катушек, состоит из концентрически расположенных катушек.

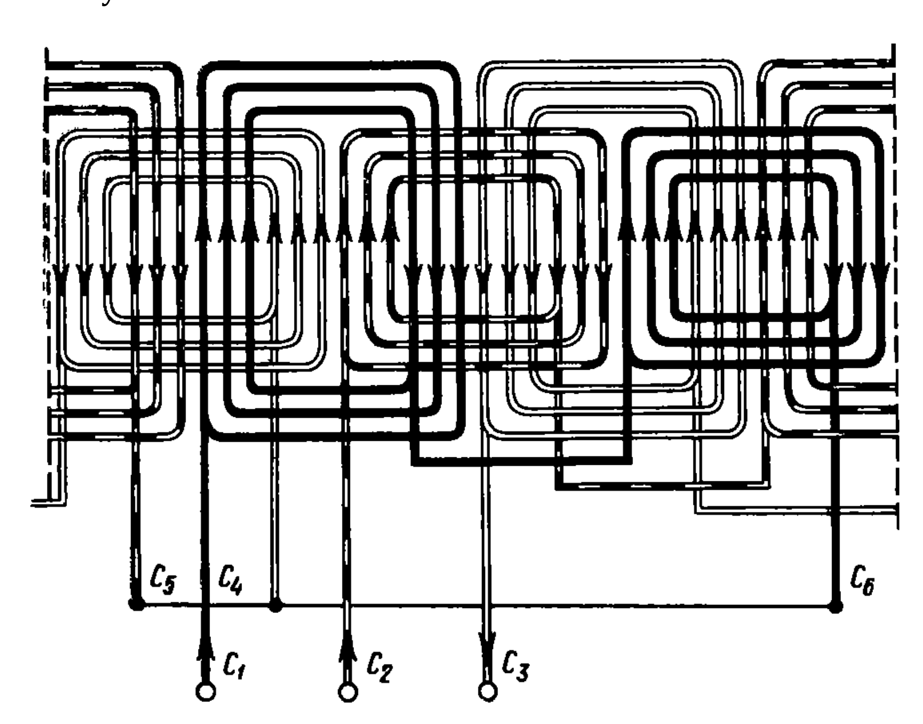


Рис. 3. Схема двухплоскостной концентрической обмотки, $2p = 4$; $Z_1 = 36$.

По способу расположения лобовых частей изображенную на рис. 3 обмотку называют двухплоскостной (двухъярусной), так как лобовые части катушек расположены в 1–й и 2–й плоскостях. Различные виды взаиморасположения плоскостей такой обмотки показаны на рис. 4.

Для того чтобы яснее представить принцип образования фазы обмотки и соединения фаз, на рис. 3 на линии пазов расставлены стрелки, которые указывают направление токов в каждом пазу в зависимости от расположения его под северным или южным полюсом в магнитном поле обмотки в какой–то определенный момент времени. В соответствии с этим проставлены направления токов на входе фаз обмотки. Таким образом, в любой момент времени направление тока в начале одной из фаз трехфазной обмотки всегда будет противоположно направлению токов в началах двух других фаз, как это и следует из векторной диаграммы фазовых токов трехфазной системы. Этим правилом необходимо пользоваться для проверки правильности выбора начал и концов фаз при составлении схемы обмотки.

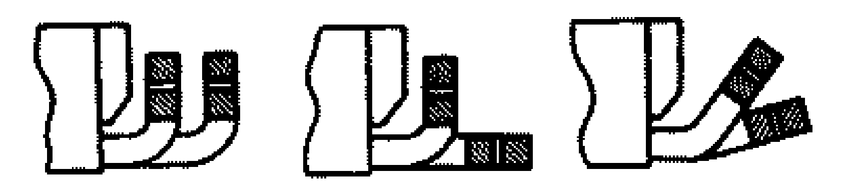


Рис. 4. Расположение лобовых частей двухплоскостной концентрической обмотки.

В однослойной обмотке число катушечных групп в фазе равно числу пар полюсов p; следовательно, число катушечных групп всей обмотки будет $3p$, т. е. $3p/2$ малых (1–й плоскости) катушечных групп и $3p/2$ больших (2–й плоскости) катушечных групп. Число $3p/2$ может быть целым тогда, когда p четное, т. е. число полюсов обмотки $2p$ равно 4, 8, 12, 16 и т. д. Это значит, что только при числе полюсов машины из указанного ряда вся двухплоскостная обмотка может быть распределена на три фазы с равным числом больших и малых катушечных групп в каждой фазе, как это имело место в обмотке, приведенной на рис. 3, или в обмотке, приведенной на рис. 5 для восьмиполюсной машины. В том же случае, когда число пар полюсов машины нечетное (число полюсов $2p$ равно 6, 10, 14, 18 и т. д.) двухплоскостная обмотка не может быть распределена по фазам с одинаковым числом больших и малых катушечных групп. Она должна иметь так называемую "переходную" катушечную группу, как бы наполовину находящуюся в первой плоскости, наполовину – во второй. Схема такой обмотки для шестиполюсной машины приведена на рис. 6. Переходные катушки изготовляют из заранее вставленных стержней и формуют в лобовых частях с обеих сторон статора, катушки имеют довольно сложную конфигурацию лобовых частей.

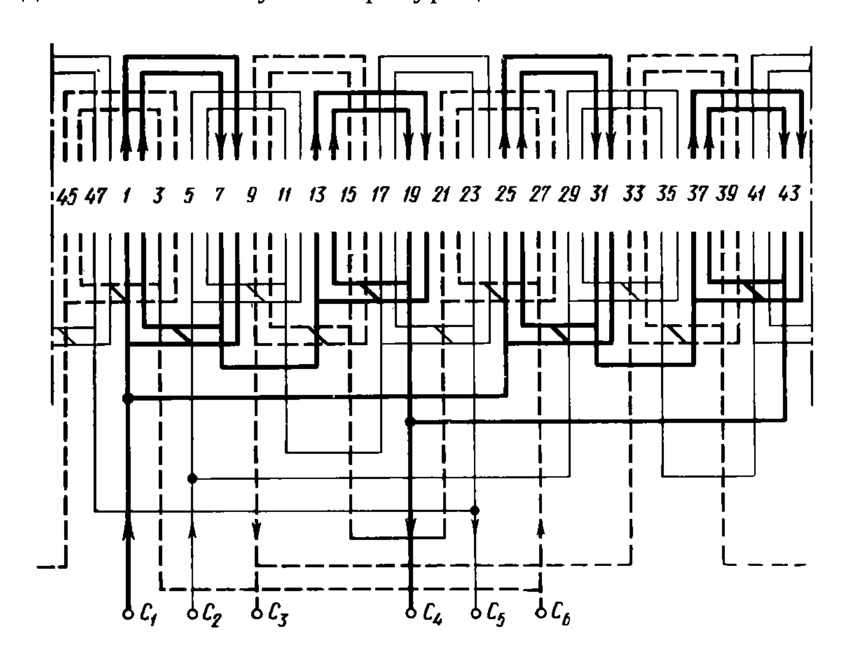


Рис. 5. Схема двухплоскостной концентрической обмотки, $2p = 8$; $Z_1 = 48$; $a_1 = 2$.

Если мы еще раз обратимся к рис. 3 и 5, то увидим, что обмотка на рис. 3 имеет последовательное соединение катушечных групп в фазе, а обмотка на рис. 5 – соединение в две параллельные ветви. Исходя из общего принципа образования параллельных ветвей, последние должны иметь одинаковые индуктивные и активные сопротивления для обеспечения равенства проходящих по ним токов.
Следовательно, обмотка, изображенная на рис. 3, при соединении в две параллельные ветви имела бы неодинаковые активные сопротивления, так как в одну параллельную ветвь входила бы малая катушечная группа, а в другую – большая с разными длинами лобовых частей и, следовательно, разными активными сопротивлениями. Что касается схемы, изображенной на рис. 5, то здесь в каждую параллельную ветвь входит по одной малой и одной большой катушечной группе и принцип одинаковости активных сопротивлений соблюден. Если же мы захотели бы эту обмотку соединить в четыре параллельные ветви, то этот принцип снова пришлось бы нарушить и получить обмотку с разными активными сопротивлениями в параллельных ветвях.

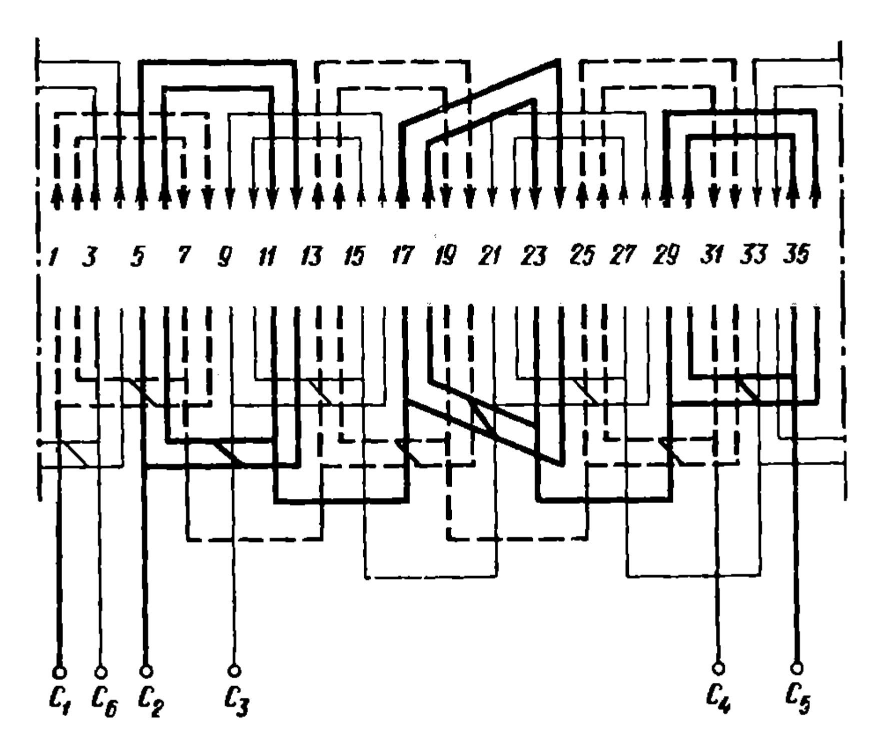


Рис. 6. Схема обмотки с переходной катушечной группой, $2p = 6$; $Z_1 = 36$.

Следует заметить, что в машинах переменного тока активное сопротивление фазы обмотки составляет обычно не более 10–12% полного сопротивления, которое в основном зависит от индуктивного сопротивления. И если учесть, что за счет различной длины прямолинейных вылетов большой и малой катушечных групп разница в их активных сопротивлениях будет также 10–12%, то разница в полных сопротивлениях параллельных ветвей (при условии равенства их индуктивных сопротивлений) и, следовательно, токов в них составит около 1%, что практически не может повлиять на работу машины. Это положение служит объяснением применения для двухполюсных машин трехплоскостных обмоток с различными длинами катушечных групп в фазах и соответственно различными активными сопротивлениями фаз обмотки (рис. 8). На рис. 7 изображена схема обмотки для четырехполюсной машины точно такой же, для которой была ранее представлена схема, изображенная на рис. 3. Различие этих схем состоит лишь в том, что обмотка на рис. 7 состоит из одинаковых катушечных групп (отсюда ее название – "равнокатушечная"). При соединении этой обмотки в две параллельные ветви разницы в активном сопротивлении параллельных ветвей не будет.

Но, учитывая сказанное выше о степени влияния неравенства активных сопротивлений в параллельных ветвях на работу машины, основной причиной применения равнокатушечных обмоток является не стремление достигнуть равенства активных сопротивлений в параллельных ветвях, а упрощение технологии изготовления U – образных заготовок, так как при этом все катушечные группы будут одинаковыми. Если в обыкновенной однослойной обмотке число видов катушек будет равно $2 \times q_1$, то в равнокатушечной обмотке это число будет только q_1.

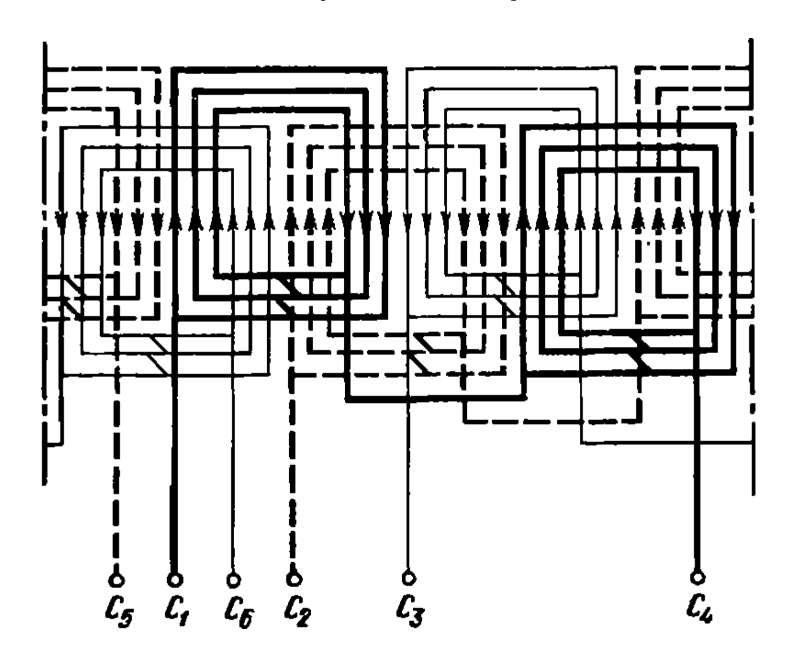


Рис. 7. Схема двухплоскостной концентрической равнокатушечной обмотки. $2p = 4$; $Z_1 = 36$.

Укладка (вставка) равнокатушечной обмотки производится с обоих торцов статора, причем отформованная лобовая часть U – образной заготовки с обеих сторон разместится в первой плоскости. Лобовые части второй плоскости формуют после укладки всех катушек в пазы статора.

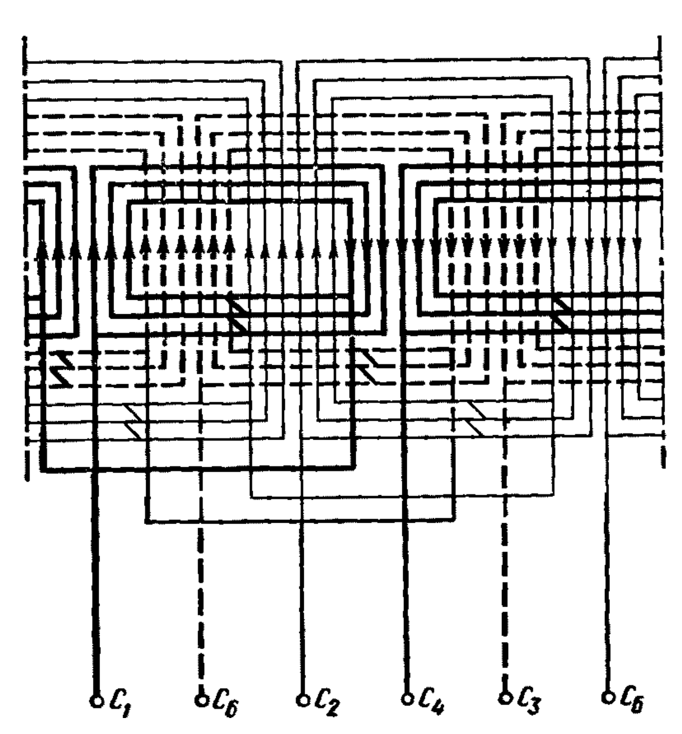


Рис. 8. Схема трехплоскостной концентрической обмотки "вразвалку", $2p = 2$; $Z_1 = 36$.

На рис. 8 представлена очень часто применяемая на практике для двухполюсных машин схема трехплоскостной обмотки (лобовые части обмотки располагаются в трех плоскостях). Как это видно из рисунка, лобовые части первой фазы обмотки располагают только в 1–й плоскости, второй фазы – только во 2–й плоскости и третьей фазы – только в 3–й плоскости. Таким образом, как об этом уже выше упоминалось, активные сопротивления фаз в этой обмотке различны. Другой особенностью этой схемы является то, что катушечная группа, состоящая из шести катушек (q_1 = 6), разбита на две концентрические полугруппы по три катушки в каждой, т. е. катушечная группа как бы развалена надвое. Отсюда такую обмотку часто называют намотанной "в развалку".
Способ намотки "в развалку" часто применяют и для машин с большим числом полюсов, когда число пазов на полюс и фазу q_1 равно шести или восьми и реже – при q_1 равном четырем. Обмотка со сравнительно большим числом q_1 спроектированная "вразвалку", дает возможность уменьшить радиальные размеры корпуса электрической машины за счет небольшого увеличения ее аксиальных размеров, что в общем–то, приводит к довольно ощутимому снижению общего веса машины. Кроме того, разбивка многокатушечных групп на полугруппы обеспечивает более простое и надежное механическое крепление лобовых частей обмотки. Трехплоскостную обмотку, изображенную на рис. 8, также можно преобразовать в равнокатушечную. При этом катушечные группы 2–й плоскости (второй фазы) останутся без изменений, лобовые части катушечных групп первой фазы (большая катушечная группа, рис.8) с задней стороны перейдут в 1–ю плоскость, а лобовые части катушечных групп третьей фазы (малая катушечная группа, рис. 8) соответственно переместятся в 3–ю плоскость. При выборе схемы для трехплоскостной обмотки "в развалку" следует руководствоваться следующими соображениями: обмотка по схеме с катушечными группами разной длины (по типу, изображенному на рис. 8) требует заготовки трех длин U – образных катушечных групп, причем большая катушечная группа иногда должна иметь миканитовые толстостенные гильзы очень большой длины, что часто вызывает затруднения при изготовлении соответствующих пресс–форм для выпечки гильз. Зато монтаж катушечных групп в статоре, формовка второй лобовой части в такой обмотке проще, чем в равнокатушечной. Обмотка по равнокатушечной схеме более проста в подготовительной части (все U – образные катушечные группы одинаковы), но зато более сложна в монтаже и формовке второй лобовой части, так как вставка всех катушечных групп при этом производится одновременно с обоих торцов статора и выступающие длинные концы разрезанных лобовых частей не дают возможности "кантовки" статора и установки его в положение удобное для монтажа лобовых частей. Последние соображения еще раз напоминают о том, что при составлении схемы для той или иной машины всегда следует принимать во внимание технологические возможности исполнения этой обмотки в определенных условиях. Рассмотрим еще одно очень важное качество трехплоскостной обмотки обеспечивающее удобство эксплуатации двигателя. В настоящее время на промышленных предприятиях находится в эксплуатации большое число крупных двигателей с разъемным статором, состоящим из двух половин – нижней и верхней. Эти двигатели, как правило, являются тихоходными (т. е. с диапазоном от 375 *об. мин.* и ниже) и очень часто по условиям эксплуатации, в особенности в металлургической и химической промышленности, требуют регулярных (1 – 2 раза в год) ревизий с выемкой ротора и осмотром состояния всех частей двигателя. Общие массы таких двигателей иногда доходят до 40–50 тонн. Естественно, такелажные работы были бы значительно облегчены при разборке и сборке по частям, сначала съем верхней половины статора, затем выемка ротора; а нижнюю половину статора в этом случае вынимать нет необходимости. Мало того, в некоторых цехах подъемные устройства вообще не рассчитаны на общую массу двигателя, т. е. предусмотрен монтаж только по частям.

При двухслойной обмотке разъем половин статора вообще очень затруднен, а иногда и просто невозможен, так как при этом приходится сильно повреждать обмотку. На рис. 9 приведена часть схемы однослойной обмотки статора двигателя переменного тока на 125 *об. мин.*, имеющего разъемный статор. Схема представлена в двух вариантах: в двух– и трехплоскостном исполнениях. Как видно из рисунка, при разъединении половин статора по линиям разъема в двухплоскостном варианте приходится демонтировать по одной катушечной группе обмотки в каждом разъеме. При трехплоскостной схеме лобовые части катушек в линию разъема не попадают; необходимо только разъединить межгрупповые перемычки.

Таким образом, в случаях, когда в эксплуатации машины с разъемным статором необходимы частые осмотры с разборкой двигателя, однослойная концентрическая обмотка, выполненная по трехплоскостной схеме, имеет неоценимое преимущество перед всеми другими видами обмоток.

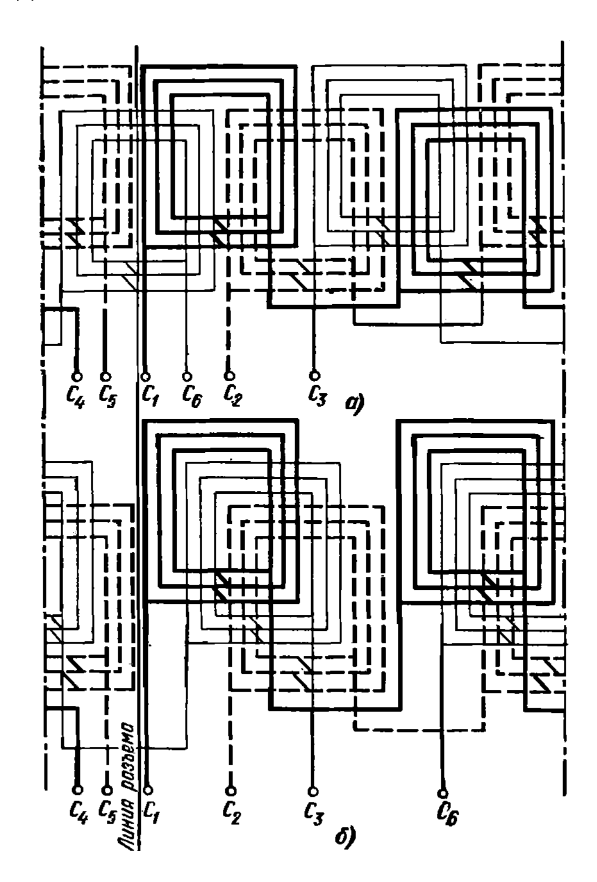


Рис. 9. Преобразование двухплоскостной обмотки (*а*) в трехплоскостную (*б*) в разъемных статорах.

Рассмотрев различные типы однослойных концентрических обмоток, сформулируем основные положения, которыми следует руководствоваться при составлении схемы обмотки:

1) исходя из технологических условий заготовки и укладки катушек, а также условий эксплуатации машины, выбирают тип обмотки (двух– или трехплоскостная, разно– или равнокатушечная);

2) определяют число катушек в катушечной группе, равное числу q_1

3) определяют шаг катушек по пазам. Шаг большой (внешней) катушки в катушечной группе равен $4q_1 - 1$. Например, в обмотке с $q_1 = 4$ шаг внешней катушки равен 15 или, как принято обозначать, шаг 1 – 16. Шаг каждой следующей внутренней катушки уменьшается на два пазовых деления, т. е. составит 1 – 14, 1 – 12 и 1 – 10;

4) определяют, возможно ли соединить проектируемую обмотку в требуемое число a_1 параллельных ветвей. Для осуществления этого требования необходимо, чтобы частное p/a_1 было целым числом;

5) расставляют направления токов под полюсами, образованными магнитным полем обмотки, соединяя при помощи межкатушечных соединений отдельные катушки в катушечные группы и при помощи межгрупповых соединений – катушечные группы в фазы; при этом выбранное направление тока в фазе должно соответствовать стрелкам во всех катушках фазы;

6) выбирают катушки, из которых должны выходить начала и концы фаз обмотки.

Как уже сказано, суммы векторов последовательно соединенных катушек каждой фазы образуют так называемую симметричную звезду фазовых э. д. с, причем в какой последовательности складывать эти векторы, т. е. соединять отдельные катушки фаз, безразлично. Другими словами, начало фазы обмотки можно брать из любой катушки этой фазы.

Практически бывает удобно начала всех трех фаз выбирать в близко расположенных друг к другу катушечных группах с таким расчетом, чтобы выводные концы статорной обмотки были по возможности короче. Для проверки правильности определения начал концов фаз следует также воспользоваться правилом о направлении токов в фазах, о котором выше уже упоминалось. Помимо рассмотренных концентрических однослойных обмоток применяются однослойные цепные обмотки (рис. 10). В отличие от концентрической все катушки цепной обмотки имеют одинаковую форму. Важным преимуществом цепных обмоток является возможность выполнения с укороченным шагом.

Развернутые схемы двухслойных обмоток. *Обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу.* Наибольшее распространение в статорах электрических машин переменного тока имеют двухслойные петлевые обмотки. Все катушки двухслойной обмотки одинаковы, что упрощает и удешевляет их изготовление.

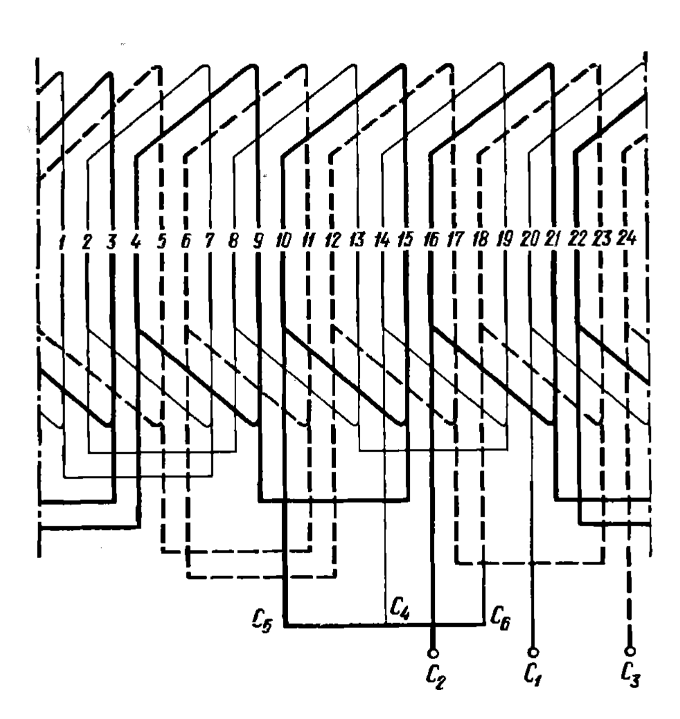


Рис. 10. Схема цепной обмотки, $2p = 4$; $Z_1 = 24$; $y_{П1} = 5$; $q_1 = 2$.

Название "двухслойной", как уже об этом упоминалось, обмотка получила потому, что в паз закладывают стороны двух катушек, а каждая катушка располагается на статоре в двух слоях. Один слой обмотки укладывается на дно паза ("нижний" слой), а другой – в части паза, прилегающей к расточке статора ("верхний" слой). Лобовые части катушки также занимают два слоя, а переход из одного слоя в другой осуществляется в головках катушек. Крепление лобовых частей двухслойной обмотки осуществляется сравнительно простым, но вместе с тем надежным способом, обеспечивающим высокую динамическую устойчивость.

Лобовые части двухслойной обмотки доступны для осмотра при профилактическом ремонте машины в эксплуатации, для очистки обмотки от загрязнений и продувке сжатым воздухом. По своим электрическим и технологическим признакам двухслойные петлевые обмотки имеют, помимо уже перечисленных выше, еще и другие преимущества, а именно:

а) практическая возможность применения катушек с любым укорочением шага, причем шаг катушки может быть как четным, так и нечетным.

б) сравнительно несложное выполнение обмотки с числом пазов на плюс и фазу (q_1) любой дробности; пп. "*а*" и "*б*" дают возможность влиять на форму кривой магнитного поля, приближая ее к синусоидальной;

в) возможность обеспечения практически допустимой асимметрии в принципиально несимметричных схемах;

г) возможность применения разновитковых катушек при полном использовании площади пазов статора, если в результате электромагнитного расчета машины окажется, что полное число активных проводников в пазу должно быть нечетным.

Перечисленные качества двухслойной петлевой обмотки и обеспечивают преимущественное применение ее для статоров электрических машин переменного тока. Для составления схем двухслойных обмоток будем пользоваться принятыми нами ранее условными графическими и буквенными обозначениями. В качестве примера составим схему двухслойной обмотки со следующими параметрами (рис. 11): $2p = 8$; $Z_1 = 48$; $y_{П1} = 5$; $a_1 = 1$. Так как диаметральный шаг этой обмотки, равный полюсному делению:

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{48}{8} = 6$$

то укорочение обмотки $K_у = y_{П1}/\tau = 5/6$. Число пазов на полюс и фазу:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2p \times m} = \frac{48}{8 \times 3} = 2$$

В соответствии с этим 1–я катушечная группа, состоящая из двух катушек, закладывается верхними сторонами катушек в пазы, условно обозначенные 1 и 2, нижними сторонами в пазы 6 и 7. Началом С1 первой фазы принимается вывод катушки из верха первого паза. Верх пазов 3, 4, 5 и 6 и низ пазов 8, 9, 10 и 11 займут соответственно катушечные группы двух других фаз. Таким образом, следующая катушечная группа первой фазы займет своими верхними сторонами пазы 7 и 8, а нижними – пазы 12 и 13. Остальные катушечные группы первой фазы займут: верхними сторонами катушек – пазы 13 и 14, 19 и 20, 25 и 26, 31 и 32, 37 и 38, 43 и 44; нижними сторонами катушек –пазы 18 и 19, 24 и 25, 30 и 37, 35 и 37, 42 и 43, 48 и 1. Для правильного образования и чередования полюсов катушечные группы при последовательном соединении (в нашем случае $a_1 = 1$ – соединение последовательное) должны соединяться одноименными выводами. При соединении таким способом всех катушечных групп первой фазы получится свободный вывод из верха катушки, заложенной в паз 43. Этот вывод и является выводным концом первой фазы С4. Начало второй фазы должно быть сдвинуто от начала первой фазы (если q_1 целое число) на 120 эл. град или на ⅔ полюсного деления. Так как полюсное деление $\tau = 6$, то начало второй фазы должно быть сдвинуто на ⅔ × 6 = 4 паза, т. е. расположено в пятом пазу. Аналогично этому начало третьей фазы располагается в девятом пазу. Концы второй и третьей фазы, также сдвинутые от конца первой фазы на ⅔ τ, должны находиться соответственно в пазах 47 и 3. Обращает на себя внимание, что в одном пазу каждого полюса (пазы 6, 12, 18 и т. д.) имеет место встречное направление токов в верхней и нижней сторонах катушек.

Это является следствием принятого укорочения шага обмотки на один паз. (Принят шаг, равный пяти, по сравнению с диаметральным шагом, равным шести.) При укорочении на два паза по отношению к диаметральному встречное направление токов будет уже в двух пазах каждого полюса. В этом легко убедиться, если самим попробовать составить схему, отличающуюся от приведенной на рис. 11 только шагом обмотки 1 – 5 (вместо 1–6), и обозначить стрелками направления токов во всех элементах обмотки. При диаметральном шаге обмотки встречных направлений токов в одном и том же пазу не будет. Мы уже упоминали о том, что в зависимости от расчетных данных катушечные группы в фазе могут быть соединены последовательно или параллельно (в две или несколько параллельных ветвей). На рис. 12 приведена схема обмотки с параметрами, аналогичными обмотке на рис. 11, но при соединении катушечных групп в две параллельные ветви ($a_1 = 2$).

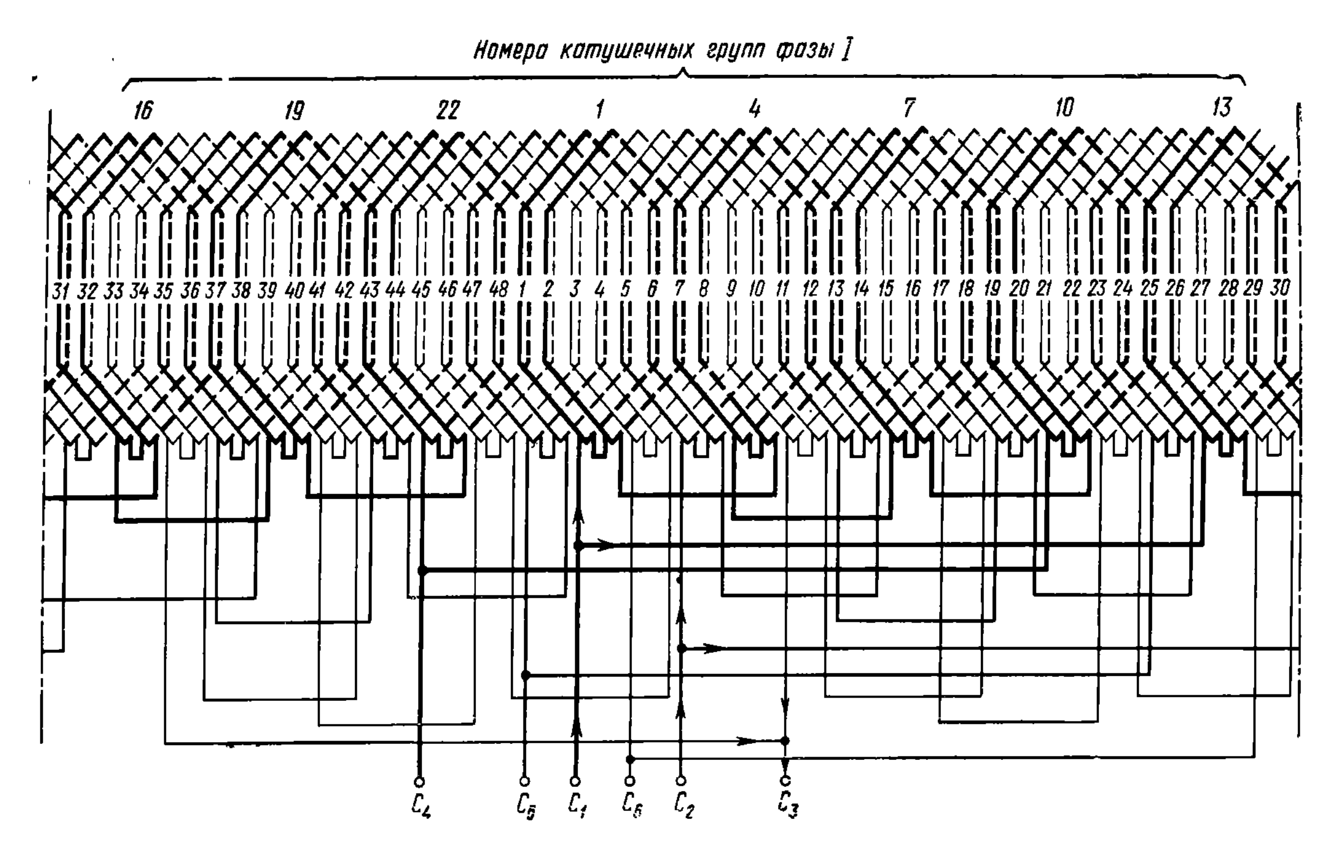


Рис. 12 Схема двухслойной обмотки, $2p = 8$; $Z_1 = 48$; $y_{П1} = 5$; $a_1 = 2$

В электрических машинах переменного тока различают два способа образования параллельных ветвей в обмотке статора – распределенный и сосредоточенный. Так, например, способ соединения параллельных ветвей, осуществленный в схеме на рис. 12, называют сосредоточенным, так как все катушечные группы, входящие в какую–либо параллельную ветвь, сосредоточены на определенной части окружности статора (в данном случае на половине статора). Для того чтобы параллельное соединение в схеме на рис. 12 сделать распределенным, надо в первую параллельную ветвь первой фазы последовательно включить катушечные группы 1, 7, 13 и 19 (за первую принимается катушечная группа, состоящая из двух катушек, верхние стороны которых находятся в пазах 1 и 2; седьмая катушечная группа соответственно состоит из катушек, верхние стороны которых находятся в пазах 13 и 14 и т. д.), а во вторую параллельную ветвь первой фазы включить катушечные группы 4, 10, 16 и 22. Аналогично образовать параллельные соединения и в остальных двух фазах. Теперь уже катушечные группы каждой параллельной ветви распределены по всей окружности статора. Схематически расположение сосредоточенных и распределенных параллельных ветвей фазы обмотки показано на рис. 13.

Как же влияет способ образования параллельных ветвей на работу обмотки и всей электрической машины? Для идеального случая, когда воздушный зазор машины строго одинаков по всей окружности и магнитные взаимодействия ротора и статора равномерны по всей окружности, оба способа равноценны. В этом случае способ сосредоточенных параллельных ветвей предпочтительней лишь потому, что внутримашинные схемные соединения несколько проще выполнить, чем при распределенном способе; соответственно требуется меньше изоляционных материалов. Последнее имеет немаловажное значение для крупных машин высокого напряжения. Но предположим, что по каким–либо причинам воздушный зазор по окружности статора неодинаков, например, произошло проседание ротора вследствие выработки баббитовой заливки подшипников. При этом возникает прогрессирующая сила одностороннего магнитного притяжения ротора, которая в еще большей степени увеличивает давление вала ротора на подшипники и, в конце концов, может привести к аварии машины. В таком случае предпочтительнее была бы обмотка с сосредоточенными параллельными ветвями. Объяснение этому состоит в следующем: в тех участках окружности, где произошло уменьшение воздушного зазора, повышается индуктивное сопротивление элементов обмотки, прилегающих к этим местам.

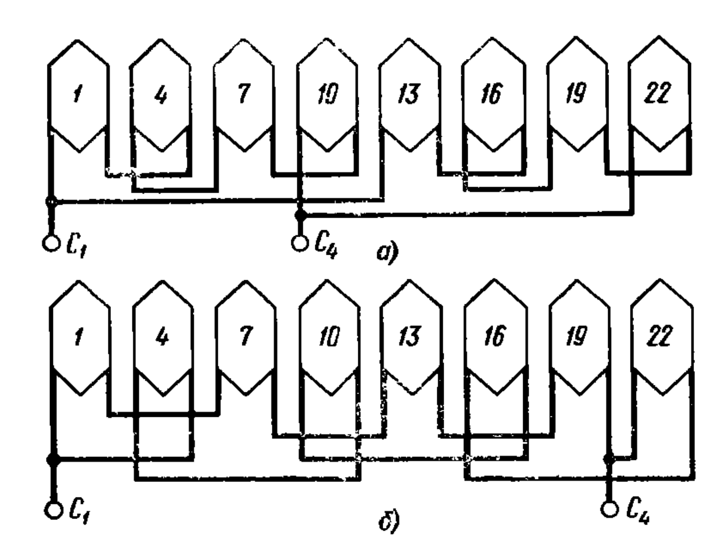


Рис. 13. Сосредоточенное (*а*) и распределенное (*б*) соединение параллельных ветвей.

Наоборот, где увеличился воздушный зазор, индуктивное сопротивление элементов обмотки снижается; в предыдущем разделе мы отмечали, что полное сопротивление обмотки и, следовательно, величина тока в ней в основном зависят от ее индуктивности. Исходя из вышесказанного, в параллельных сосредоточенных ветвях проходят разные по величине токи, а именно: в верхней ветви больший ток, а в нижней меньший. Так как сила взаимодействия ротора со статором на отдельных участках расточки зависит не только от величины воздушного зазора между ротором и статором, но и от токов, проходящих по обмоткам роторами статора на этих участках, то больший ток в верхней параллельной ветви будет как бы подтягивать ротор вверх, облегчая давление его на подшипники. Заметим, что положительное действие сосредоточенных параллельных ветвей сопровождается отрицательным – увеличением тока в одной из параллельных ветвей, что может привести к нежелательным последствиям, если сечение проводов обмотки не имеет соответствующего запаса. Достоинством распределенных параллельных ветвей является то, что токи в них всегда одинаковы, вне зависимости от состояния воздушного зазора. Но, разумеется, такое соединение не способствует выравниванию магнитных сил взаимодействия ротора со статором при смещении зазора.

Общие рекомендации по выбору способа образования параллельных ветвей могут быть следующими: в статорах асинхронных двигателей, где воздушный зазор делается минимально допустимым по механическим условиям работы узлов машины, даже при незначительном нарушении соосности статора и ротора (на 0,2 – 0,3 *мм*.) разница между максимальной и минимальной величинами воздушного зазора в диаметрально противоположных точках окружности расточки может составить 100% и более. Силы одностороннего магнитного притяжения при этом могут достигнуть больших величин. Следовательно, надо применить сосредоточенные параллельные ветви. В статорах синхронных двигателей и генераторов, где расчетный воздушный зазор сравнительно велик, небольшое нарушение соосности статора и ротора по тем или иным причинам не приводит к существенной разнице между максимальным и минимальным воздушным зазором и, следовательно, к образованию опасных магнитных сил. В этих случаях следует применить распределенную параллельную обмотку, которая предохраняет параллельные ветви от перегрузки током.

Следует заметить, что часто, в особенности для вертикальных синхронных гидрогенераторов, даже при очень большом воздушном зазоре применяют все же сосредоточенные параллельные ветви, если условия монтажа и эксплуатации не могут предотвратить значительных изменений величины воздушного зазора. Таким образом, при составлении схемы обмотки какой–либо конкретной электрической машины следует выбрать тот или иной способ образования параллельных ветвей в зависимости от параметров обмотки, конструкции механических узлов и эксплуатационных условий.

Возможное число параллельных ветвей a_1 обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу определяется требованием, по которому отношение $2p/a_1$ должно выражаться целым числом, так как указанное отношение равно числу катушечных групп, приходящихся на каждую параллельную ветвь; а это число, естественно, не может быть дробным. Отсюда следует, что число параллельных ветвей может быть равно 1; 2; p и $2p$ при любом числе полюсов машины. Число параллельных ветвей может быть равно $p/2$, $p/3$, $p/4$, p/n только в обмотках, число полюсов которых делится соответственно на 4, 6, 8,..., 2 n, т. е. число параллельных ветвей может быть равно:

$p/2$	– для обмоток имеющих 4, 8, 12, 16 полюсов и т. д.
$p/3$	– для обмоток имеющих 6, 12, 18, 24 полюсов и т. д.
$p/4$	– для обмоток имеющих 8, 16, 24, 32 полюсов и т. д.
$p/5$	– для обмоток имеющих 10, 20, 30, 40 полюсов и т. д.
$p/6$	– для обмоток имеющих 12, 24, 36, 48 полюсов и т. д.

Обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу. Выше упоминалось, что одним из важнейших преимуществ двухслойной петлевой обмотки является практическая возможность выполнения обмотки с числом пазов на полюс и фазу q_1 любой дробности. Представим себе такой случай: асинхронный двигатель с параметрами обмотки статора Z_1 = 72; $2p$ = 12, a_1 = 1 модернизируют при капитальном ремонте с увеличением мощности за счет повышения его номинальной частоты вращения (синхронной) с n_c = 500 *об. мин.* ($2p$ = 12) по n_c = 600 *об. мин.* ($2p$ = 10). До модернизации $q_1 = Z_1/(2p \times 3) = 72/(12 \times 3) = 2$, после модернизации $q_1 = 72/(10 \times 3) = 2\frac{2}{5}$. Как указывалось выше, число q_1 определяет число катушек в катушечной группе. Но это последнее не может быть дробным. Дробное q_1 означает, что в обмотке не все катушечные группы одинаковы. Одни из них состоят из большего числа катушек и называются большими катушечными группами, другие – с меньшим числом катушек называются малыми. В общем случае дробное число пазов на полюс и фазу представляется в виде целого числа и правильной дроби.

$$q_1 = b + \frac{c}{d}$$

Для нашего примера: b = 2, c = 2, d = 5. При составлении схемы часть катушечных групп комплектуется из b + 1 катушек (большие катушечные группы), а часть из b катушек (малые катушечные группы). Число больших и малых катушечных групп в каждой фазе, а следовательно и во всей обмотке определяется дробной частью (c/d) числа q_1. А именно, в применении к выбранному нами примеру на каждые d = 5 катушечных групп во всей обмотке (также и в фазе) приходится c = 2 больших катушечных групп, состоящих из b + 1 = 3 катушек, и d – c = 3 малых катушечных групп, состоящих из b = 2 катушек.

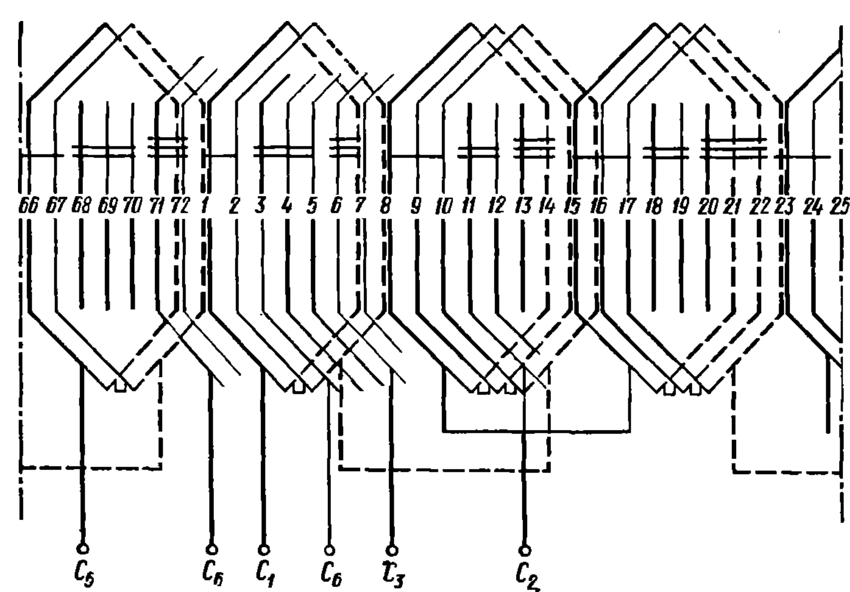


Рис. 14. Схема двухслойной обмотки, $2p = 10$; $Z_1 = 72$; $a_1 = 1$; $q_1 = 2\frac{2}{5}$

Для выполнения схемы обмоток остается только определить порядок чередования больших и малых катушечных групп по окружности статора. Так как на каждые d катушечных групп по всей окружности статора будет приходиться c и d–c соответственно больших и малых, то первые d катушечных групп называют периодом чередования и записывают (по данным нашего примера): (2 3 2 3 2) или в любом другом распределении (2 2 2 3 3), (2 3 3 2 2), (3 2 2 2 3) и т. д. Выбрав какое–либо распределение для периода чередования, повторяют его столько раз, сколько число d содержится в полном числе катушечных групп всей обмотки, т. е. $3 \times 2p/d$ раз. Для выбранного нами примера период чередования повторяется 3 × 10/5 = 6 раз и полное чередование катушечных групп по окружности статора примет вид:

(2 3 2 3 2), (2 3 2 32), (2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2).

Практически для полной характеристики чередования катушечных групп всей обмотки достаточно записать: (2 3 2 3 2) и т. д. На рис. 14 построена часть схемы обмотки статора при $Z_1 = 72$; $2p = 10$; $a_1 = 1$; $q_1 = 2\frac{2}{5}$ в соответствии с полученным в нашем примере чередованием катушечных групп (одной, двумя и тремя черточками отмечена разбивка катушечных групп по фазам). Распределение больших и малых катушечных групп внутри периода чередования может быть совершенно произвольным. Любое из приведенных выше в нашем примере распределений обеспечивает правильное выполнение схемы обмотки. Практически принято распределять большие и малые катушечные группы внутри периода чередования по возможности равномерно. Исходя из этого положения, рекомендуем наиболее простой, проверенный практикой, способ определения чередования двухслойных петлевых обмоток с числом q_1 любой дробности. Так, например, требуется составить чередование катушечных групп по окружности статора при $q_1 = 2^{3}/_{10}$. По виду дроби определяем, что чередование будет состоять из семи двухкатушечных и трех трехкатушечных групп.

Выписываем строчку из семи двоек:

22 22 22 2
↑ ↑ ↑

стараясь по возможности равномерно распределить большие и малые катушечные группы. В промежутки, указанные стрелками, вставляем тройки, получаем законченное чередование: (2 2 3 2 2 3 2 2 3 2). Если $q_1 = 2^7/_{10}$, то трехкатушечных групп будет больше, чем двухкатушечных. Поэтому первую строчку составляем из семи троек, а между ними расставляем двойки.

Необходимость проверки приемлемости выбранного распределения катушечных групп внутри периода чередования может возникнуть лишь в том случае, если в составляемой схеме принципиально необходимо выполнить заданный тип параллельных ветвей (сосредоточенные или распределенные).

Число возможных параллельных ветвей в двухслойных петлевых обмотках с дробным q_1 определяется из соотношения $2p/(a_1 \times d)$ = целому числу. Все сказанное выше о трехфазных обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу справедливо для всех значений q_1, кроме тех, когда знаменатель дробности d равен или кратный трем. В этом последнем случае получается так называемая несимметричная трехфазная обмотка. Составление схем несимметричных обмоток рассматривается в §4.

Упрощенные способы изображения схем обмоток. Рассмотренный способ изображения схем обмоток в виде развертки окружности статора на плоскости достаточно нагляден и дает полное представление о параметрах обмотки, но при большом числе пазов и полюсов схема в виде развертки статора на плоскости теряет одно из главных преимуществ способа – наглядность. Так, например, если нам необходимо составить схему для статора, имеющего 360 пазов (для тихоходных машин такое большое число пазов не является редкостью), и расстояние между линиями соседних пазов на чертеже мы возьмем 5 *мм*., то общая длина чертежа будет около 2 *м*. Понятно, что на таком чертеже трудно ориентироваться и уловить, например, принцип построения параллельных ветвей, не говоря уже о том, что вычерчивание такой схемы потребует много времени. Существует несколько упрощенных способов составления схем обмоток, которые для практических целей вполне заменяют развернутые схемы, а с точки зрения принципа выполнения внутримашинных соединений обмотки являются даже более наглядными, чем развернутые. Упрощенные способы применяют, главным образом, для изображения схем двухслойных обмоток. Основным элементом упрощенной схемы является катушечная группа, состоящая из q_1 катушек. Последние, как мы уже знаем, внутри катушечной группы соединяют всегда последовательно. Таким образом, обмотчику для его практической работы достаточно дать руководство, которое в простой и удобной форме указывало бы на порядок соединения катушечных групп.

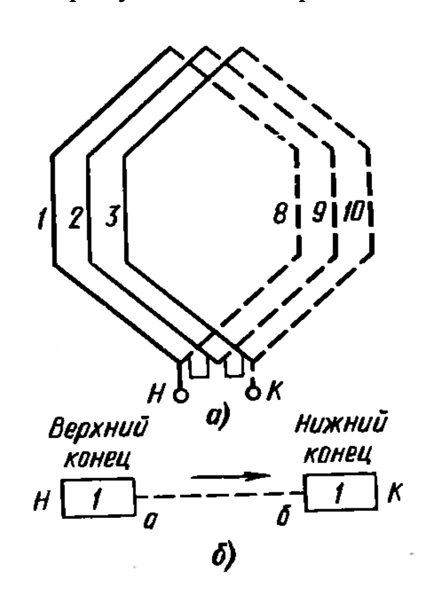


Рис. 15. Катушечная группа упрощенной схемы.

На рис. 15, *а* показана катушечная группа обмотки $q_1 = 3$ и шагом обмотки 1 – 8. Условимся за начало катушечной группы считать вывод, идущий из верхнего слоя паза 1, за конец катушечной группы – вывод, идущий из нижнего слоя паза 10. Каждая катушечная группа будет иметь два конца – нижний и верхний вне зависимости от числа катушек, входящих в нее, или шага обмотки. Чтобы не вычерчивать каждый раз катушечные группы, в упрощенной схеме их изображают в виде пунктирной линии а – б (рис. 15, *б*). При этом будем считать, что левый прямоугольник означает верхний, а правый – нижний концы катушечной группы.

Общее число катушечных групп в двухслойной трехфазной обмотке всегда равно 6×p (так как число катушечных групп в фазе равно 2p). Тогда, например, для восьмиполюсной обмотки (рис. 11) общее число групп будет 24, соответственно каждая катушечная группа будет иметь номер с 1 по 24. Если условиться, что катушечная группа 1 принадлежит фазе I, а в каждую фазу включают катушечные группы, расположенные по статору через две группы, принадлежащие другим фазам, то остальные катушечные группы фазы I будут иметь номера, отличающиеся на три, а именно 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22. В фазу II, начинающуюся с группы 3, войдут катушечные группы с номерами: 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 и 24. Номера катушечных групп фазы III будут: 5, 8, 11, 14, 1', 20, 23 и 2. Пользуясь принятым условным изображением катушечной группы, на рис. 16, *а* приведены все катушечные группы обмотки с 2p = 8. Если верхний конец первой катушечной группы фазы I принять за начало катушечной группы, то нижний конец этой группы будет концом первой катушечной группы.

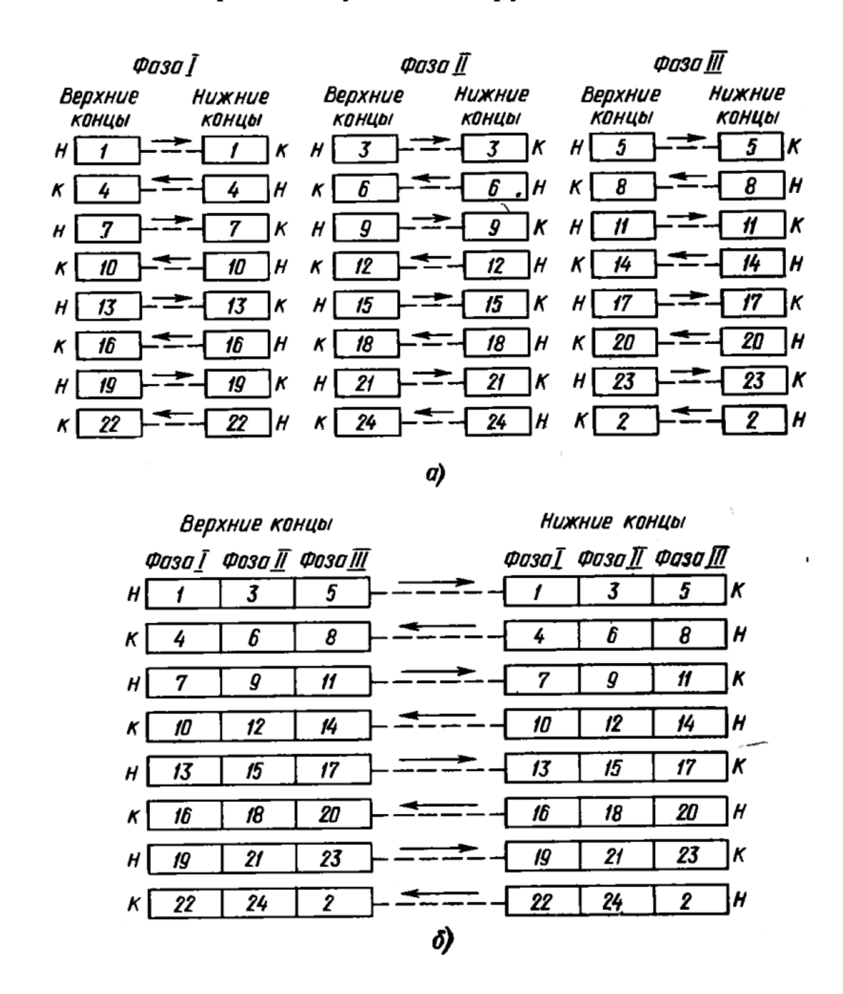


Рис. 16. Катушечные группы двухслойной обмотки, 2p = 8.

Такое же распределение начал и концов получим для всех нечетных катушечных групп фазы I. В четных катушечных группах этой фазы обозначение концов будет противоположным. То же самое обозначение концов катушечных групп получаем и для фаз II и III. В соответствии с этим правилом расставлены буквы Н и К около каждой катушечной группы. Так как соединение катушечных групп в фазах совершенно одинаково, то при составлении упрощенных схем описываемым способом соответственные катушечные группы всех трех фаз объединяют (рис. 16, *б*). Таким же образом можно составить схему для обмотки с любым числом полюсов, причем число горизонтальных рядов в схеме будет всегда равно числу полюсов обмотки. Вертикальные ряды включают номера катушечных групп, входящих в данную фазу, причем номера последних катушечных групп в зависимости от числа полюсов машины будут:

Для фазы I	6p – 2
Для фазы II	6p
Для фазы III	2

Например, для машины с 2p = 48:

Для фазы I	6 × 24 – 2 = 142
Для фазы II	6 × 24 = 144
Для фазы III	2

Соединение катушечных групп на упрощенной схеме в зависимости от числа параллельных ветвей в фазе производится следующим образом. При a_1 = 1 (последовательное соединение) все строки соединяют перемычками, образуя непрерывную "змейку" при последовательном прохождении всех катушечных групп фазы. На рис. 17 показано такое соединение. Из этого рисунка видно, что катушечные группы соединяют одноименными выводами (нижний с нижним, верхний – с верхним), а для принятого нами обозначения начал и концов катушечных групп конец предыдущей катушечной группы соединяется с началом последующей.

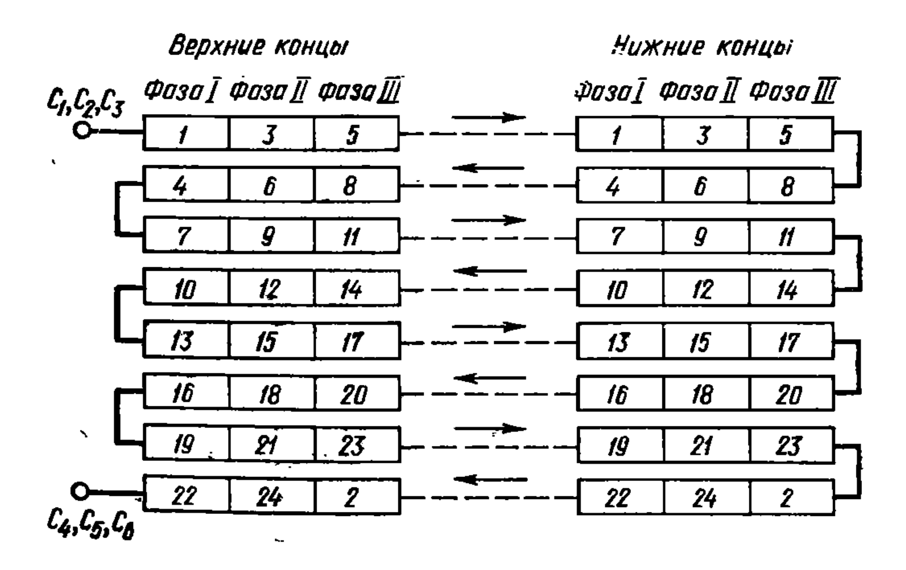


Рис. 17. Последовательное соединение катушечных групп, 2p = 8.

При параллельном соединении, для любого возможного числа параллельных ветвей данной обмотки, направление обхода по всем горизонтальным строкам в каждой параллельной ветви, если начинать обход от начала фазы, должно совпадать с направлением обхода горизонтальных строк по "змейке" при последовательном соединении. Направления обхода горизонтальных строк на рис. 17 и 18 показаны стрелками. В соответствии с этим правилом на рис. 18 показано соединение обмотки с 2p = 8 в две параллельных ветви двумя уже известными нам способами – сосредоточенным (рис. 18, *а*) и распределенным (рис. 18, *б*). Рассмотренный упрощенный способ изображения схемы обмотки статора двигателей переменного тока, принят на заводе "Электросила" и может встретиться в заводской документации при получении двигателя.

Но поскольку этот способ не дает полного представления о всех параметрах обмоток (по схемам на рис. 17 и 18 нельзя определить шаг обмотки, способ соединения фаз, числа Z_1 и q_1 чередование катушечных групп по окружности статора при дробном q_1), то заводской чертеж обычно дополняется соответствующей таблицей. На рис. 19 представлен чертеж схемы обмотки статора синхронного двигателя с 2p = 24 в таком виде, как это обычно выполняется в заводской документации.

Заметим, что параллельные ветви в этой обмотке выполнены распределенным способом, как для большинства синхронных двигателей в соответствии с изложенными выше соображениями. Приведем еще один упрощенный способ составления схем двухслойных обмоток, который также часто применяется в практике и даже имеет некоторые преимущества перед только что рассмотренным.

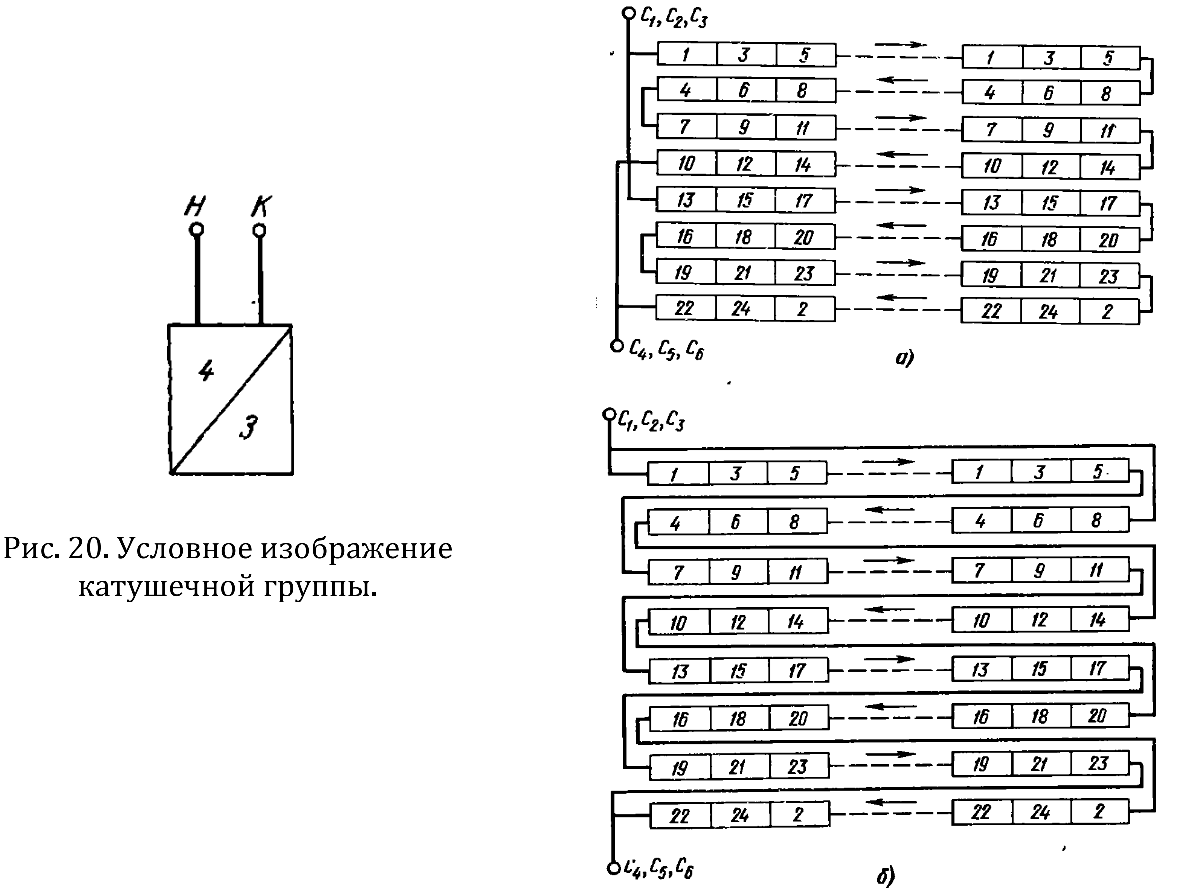


Рис. 20. Условное изображение катушечной группы.

Рис. 18. Соединение катушечных групп, $2p = 8$; $a_1 = 2$.

Эти преимущества заключаются в том, что по изображенной схеме с принятыми условными обозначениями можно определить не только число полюсов машины и характер соединения параллельных ветвей, но также и числа Z_1 и q_1, чередование катушечных групп по окружности статора и в фазе для обмоток с дробным q_1 и способ соединения фаз. Основным элементом схемы здесь также является катушечная группа, изображенная так, как это дано на рис. 20.

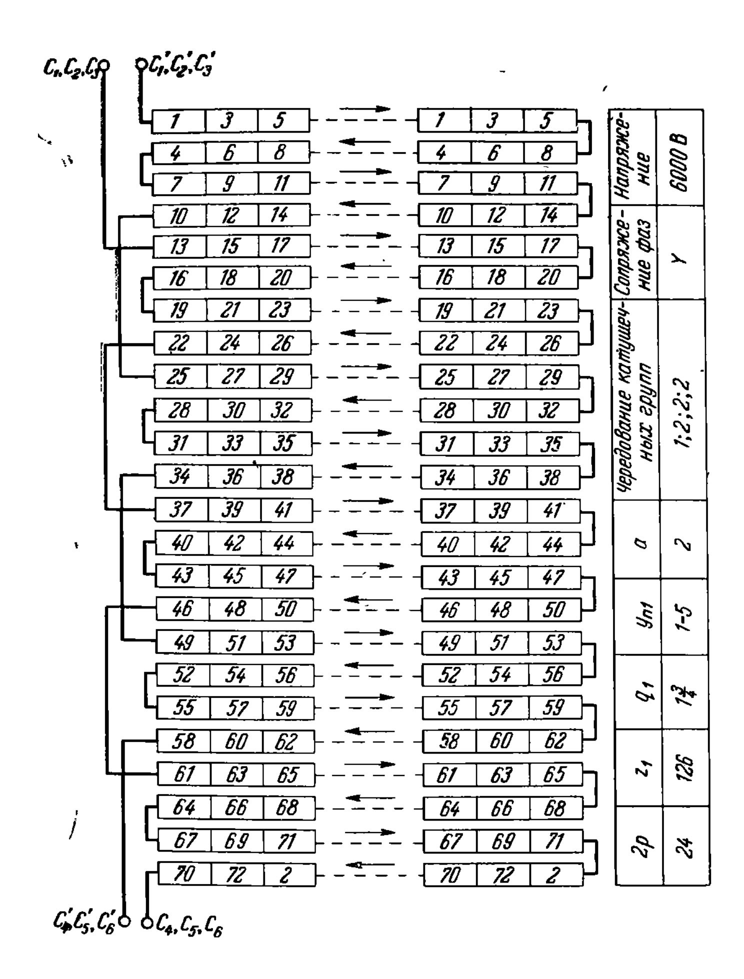


Рис. 19. Упрощенная схема двухслойной обмотки с таблицей основных данных.

Цифра в левом верхнем углу прямоугольника обозначает порядковый номер данной катушечной группы по окружности статора, цифра в правом нижнем углу соответствует числу катушек в этой катушечной группе. Обозначение начал и концов катушечных групп в этом способе несколько отличается от обозначений принятых в предыдущем способе. А именно, для рассматриваемого способа все левые выводы катушечных групп являются нижними (выходящими со дна паза первой катушки в группе) и называются началами, все правые выводы катушечных групп являются верхними (выходящими из верхнего слоя последней катушки в группе) и называются концами. Такое обозначение соответствует технологическому исполнению схемы обмотки, так как все выводы фаз (начала и концы) в подавляющем большинстве обмоток берутся из нижнего слоя катушек.

Для примера возьмем ту же обмотку (рис. 11), для которой уже был составлен ряд упрощенных схем по первому способу. Упрощенная схема этой обмотки по второму способу при последовательном соединении всех катушечных групп в фазе представлена на рис. 21, *а* и соединенная в две распределенные параллельные ветви–на рис. 21, *б*. Как видно из этих рисунков, изображение фаз – раздельное; номера катушечных групп соответствуют их последовательному расположению по окружности статора; соответственные катушечные группы разных фаз (например, 1, 3 и 5 и т. д.) располагаются друг под другом. Основное правило соединения катушечных групп состоит в следующем: нечетная с четной катушечные группы соединяют одноименными выводами катушечных групп (либо левыми –нижними, либо правыми – верхними). Нечетные или четные группы соединяют разноименными выводами катушечных групп. Фазы на рис. 21, *а* соединены в треугольник, на рис. 21, *б* – в звезду. Подобным способом изображения схем удобно пользоваться для обмоток с дробным q_1. На рис. 22 представлена схема для обмотки $2p = 24$, $q_1 = 1¾$.

Сравнивая рис. 19 и 22 предпочтение следует отдать способу, повязанному на рис. 22, так как при этом видно, какие катушечные группы состоят из одной и двух катушек, а также легко проверяется число трехкатушечных групп в каждой параллельной ветви. Таким образом, можно рекомендовать пользоваться первым упрощенным способом при составлении схем двухслойных обмоток с целым числом q_1 и вторым – для схем с дробным q_1.

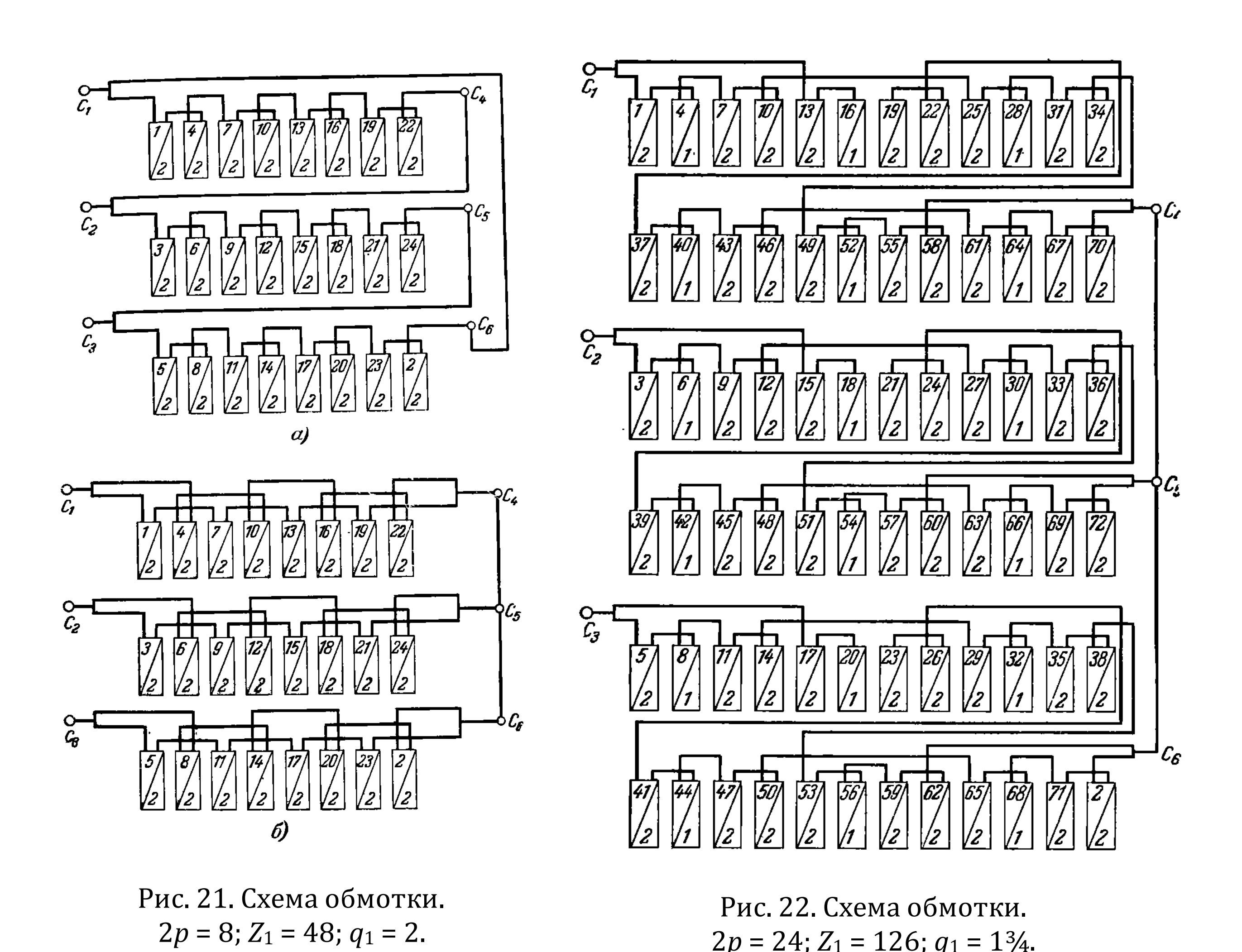


Рис. 21. Схема обмотки.
$2p = 8$; $Z_1 = 48$; $q_1 = 2$.

Рис. 22. Схема обмотки.
$2p = 24$; $Z_1 = 126$; $q_1 = 1¾$.

Наряду с рассмотренными упрощенными схемами, их также называют универсальными, большое распространение получили торцевые, весьма удобные при электрообмоточных работах, так как по своему существу они являются монтажными схемами. В этих схемах, так же как и в универсальных, показывают только внутримашинные соединения. Для составления торцевой схемы чертится окружность и делится на $6 \times p$ равных частей. Каждый из полученных отрезков дуги обозначает катушечную группу (число катушечных групп во всех трех фазах обмотки равно $6 \times p$). Концы дуг отгибают, один – к центру окружности (концы групп), другие – наружу (начала групп). Выводы катушечных групп нумеруют: начало первой группы обозначают цифрой 1, конец – 2, начало второй катушечной группы – 3, конец – 4, начало третьей – 5, конец– 6 и т. д. Начало первой катушечной группы принимают за начало фазы I. Тогда начала двух других фаз (как это имеет место в подавляющем большинстве схем трехфазных обмоток статоров) будут соответственно в третьей и пятой катушечных группах. Следовательно, по принятому условному обозначению выводов торцевой схемы началу I, II и III фаз будут соответственно принадлежать выводы 1,5 и 9. Далее обозначают условное направление тока в катушечных группах фазы I. Для этого задаются каким–либо направлением тока в первой катушечной группе и отмечают его стрелкой.

Во второй катушечной группе этой же фазы направление тока будет обратное; в третьей и всех других нечетных группах показывают направление тока, совпадающее с направлением в первой группе; в четвертой катушечной группе и всех других четных группах – совпадающим с направлением во второй группе. В соответствии с заданным числом параллельных ветвей в фазе, и соблюдая при этом указанное стрелками направление токов в катушечных группах, соединяют катушечные группы. Аналогичным образом формируют и две другие фазы.

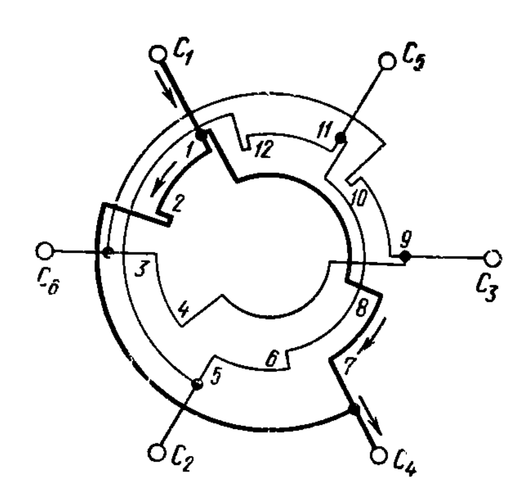


Рис. 23. Торцевая схема обмотки.
$2p = 2$; $a_1 = 2$

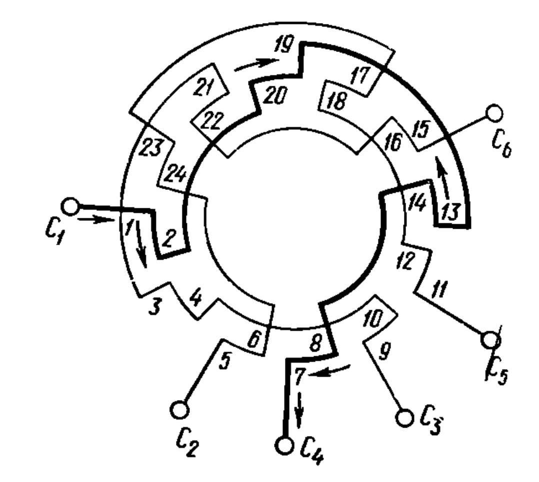


Рис. 24. Торцевая схема обмотки
$2p = 4$: $a_1 = 1$

В качестве примера приведем простейшие торцевые схемы для двухполюсной машины при $a_1 = 2$ (рис. 23) и для четырехполюсной машины при $a_1 = 1$ (рис. 24), а также более сложные схемы обмоток со следующими основными данными: $2p = 8$, $a_1 = 2$ (рис. 25); $2p = 10$, $a_1 = 10$ (рис. 26); $2p = 10$, $a_1 = 2$ (рис. 27). Для машин с большим числом полюсов, например $2p = 36$, $2p = 48$, наносить на чертежи торцевой схемы все (межгрупповые соединения становится слишком затруднительным. Поэтому в применяемых на практике торцевых схемах (например, в документации, прилагаемой к машинам завода "Уралэлектротяжмаш") изображают только дуги, обозначающие катушечные группы с соответствующими номерами выводных концов катушечных групп в принятом для торцевой схемы порядке. А вместо непосредственного изображения межгрупповых соединений чертеж схемы дополняется цифровой таблицей, указывающей порядок соединения выводных концов катушечных групп. В этой же таблице обычно также указываются число полюсов машины, заданное число параллельных ветвей в фазе и номера выводов катушечных групп, которые являются началами и концами фаз.

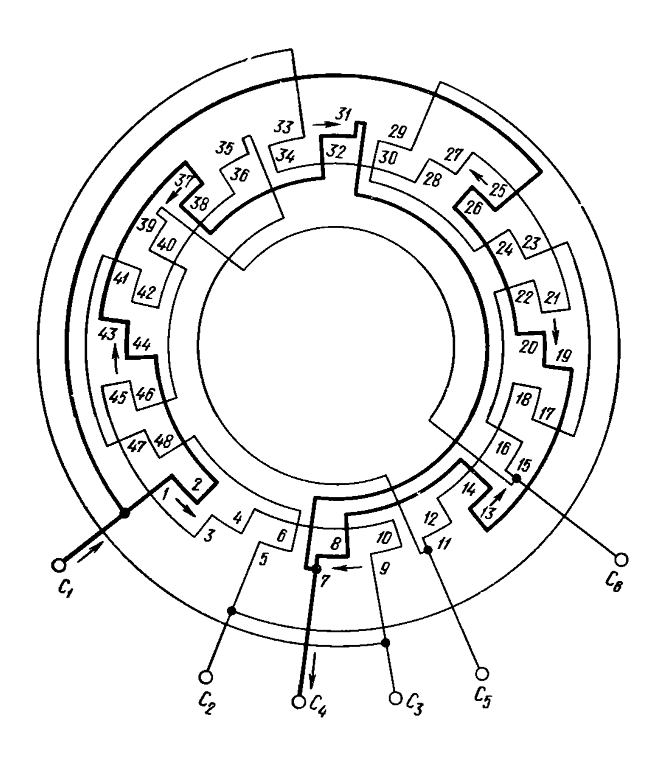


Рис. 25. Торцевая схема обмотки при $2p = 8$; $a_1 = 2$.

На рис. 28 представлена торцевая схема с цифровой таблицей в таком виде, как это имеет место в заводской документации. На этой схеме, например, соединение 2 – 8 указывает, что конец первой группы, обозначенный цифрой 2, должен быть соединен с концом четвертой группы, обозначенным цифрой 8. Соответственно каждая пара цифр, написанная через тире, обозначает одно межгрупповое соединение. Следует заметить, что торцевая схема, так же как универсальная схема первого вида, не дает наглядного представления о составе катушечных групп в схемах с дробным q_1.

Обмотки многоскоростных электродвигателей. Изменения частоты вращения асинхронного двигателя возможно добиться несколькими способами. Как известно, действительная частота вращения асинхронного двигателя отличается от его синхронной частоты вращения, определяемой формулой $nc = 60 \times f/p$, на величину скольжения, которое в основном зависит от величины активного сопротивления цепи ротора. Изменяя его путем включения в цепь обмотки фазного ротора дополнительного регулируемого сопротивления (специальные реостаты), получаем возможность регулировать в некоторых пределах частоту вращения асинхронного двигателя. Ввиду больших потерь энергии за счет выделения большого количества тепла в дополнительном сопротивлении этот способ регулирования частоты вращения может быть применен только для двигателей с кратковременным режимом работы (для привода лебедок, подъемников и т. д.).

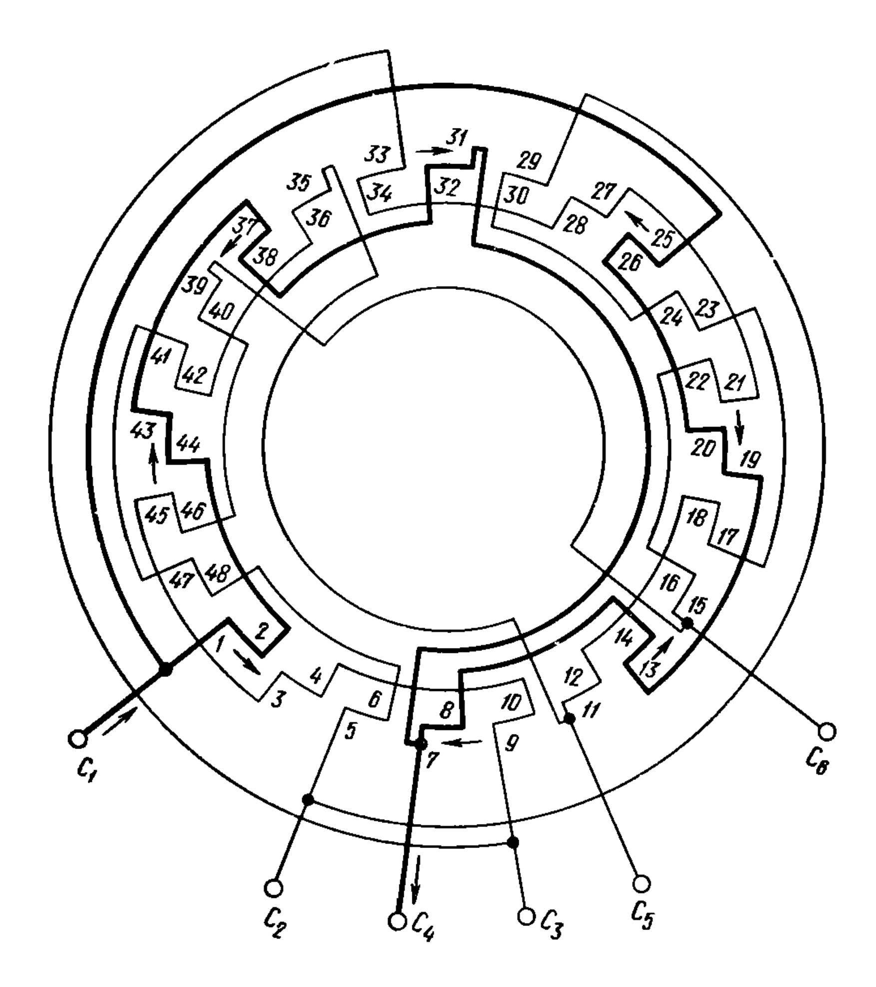


Рис. 26. Торцевая схема обмотки, $2p = 10$; $a_1 = 10$.

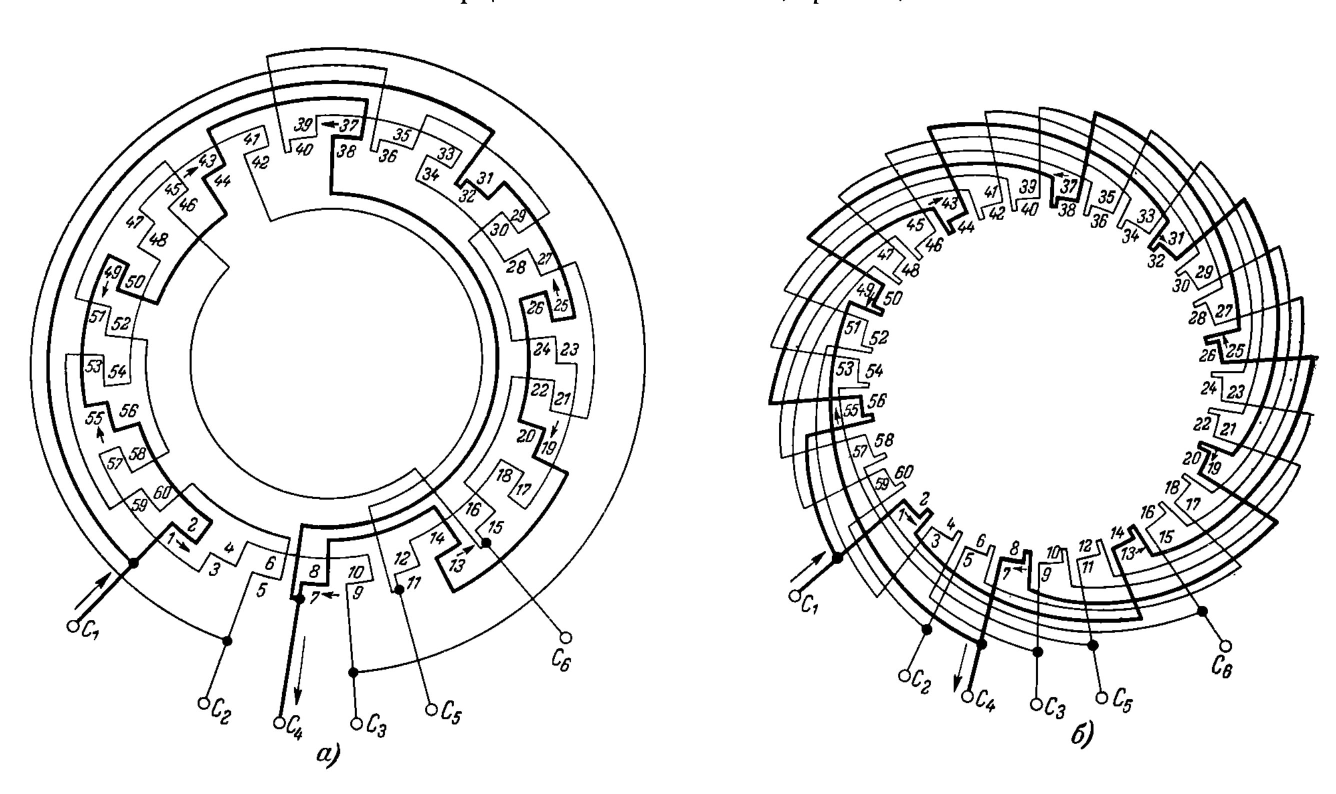
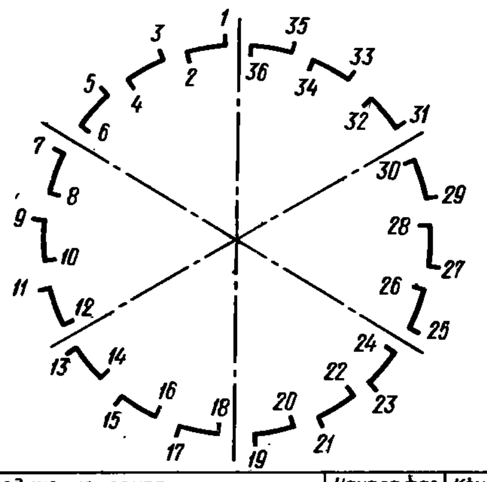


Рис. 27. Торцевая схема обмотки, $2p = 10$; $a_1 = 2$

а – сосредоточенные параллельные ветви; *б* – распределенные параллельные ветви



Соединение групп	Начала фаз	Концы фаз
2-8; 10-16; 18-24; 26-32; 34-4; 6-12; 14-20; 22-28; 30-36; 7-13; 15-21; 23-29; 11-17; 19-25; 27-33;	C_1–1 C_2–5 C_3–9	C_4–31 C_5–35 C_6–3

Рис. 28. Торцевая схема обмотки с цифровой таблицей, $2p = 6$; $a_1 = 1$

Исходя из приведенной формулы, изменять частоту вращения можно за счет изменения величины f. Для этой цели питание асинхронного двигателя осуществляется от отдельного агрегата, состоящего из нескольких электрических машин, что экономически может быть оправдано только в некоторых специальных установках. Наиболее рациональным способом изменения частоты вращения асинхронных двигателей, предназначенных для длительного режима работы, является переключение обмотки статора на различное число полюсов. Следует отметить, что этот способ обеспечивает вращение двигателей только с определенными фиксированными частотами n_1, n_2, n_3 и т. д. В то время как первые два способа дают плавное регулирование частоты вращения. В данном разделе мы остановимся на способе изменения частоты вращения путем изменения величины p (полюсности машины), так как это непосредственно связано с применением специальных схем обмоток статоров. Асинхронные двигатели, у которых номинальная частота вращения изменяется посредством изменения числа полюсов обмотки статора, носят название многоскоростных. Существуют двух–, трех– и четырехскоростные двигатели. Способы изменения числа полюсов обмотки также могут быть разными. На рис. 29 представлен принцип выполнения двухскоростной обмотки статора со следующими данными: $Z_1 = 126$; $a_1 = 1$; $2p = 10$ или 12. Этот способ состоит в том, что половина катушек статора (все нечетные) составляют обмотку $2p = 10$, другая половина (все четные) – обмотку $2p = 12$. Соответственно выводные концы катушек и сборка схемы обмотки $2p = 10$ производится на левой стороне статора, а при $2p = 12$ – на правой стороне статора. В принципе обе обмотки можно было бы соединять и на одной стороне, но при этом сильно усложняются монтаж и крепление схемных соединений. При расчете обмотки и распределении ее на катушечные группы исходят из числа пазов, приходящихся на каждую обмотку. Тогда, для $2p = 10$:

$$q_1 = \frac{63}{6 \times 5} = 2\frac{1}{10}$$

с чередованием катушечных групп по окружности статора (2222222223) и т. д. Для 2р = 12:

$$q_1 = \frac{63}{6 \times 6} = 1¾$$

с чередованием катушечных групп (2221) и т. д. В соответствии с этим и выполнены схемные соединения на рис. 29.

Шаг обмотки в таких схемах выбирается оптимальным для двух обмоток, т. е. диаметральным или несколько удлиненным для обмотки на меньшую и укороченным для обмотки на большую частоту вращения. По параметрам обмотки в нашем примере диаметральный шаг для большей частоты вращения равен $2^1/_{10} \times 3 = 6^3/_{10}$, для меньшей $1\frac{3}{4} \times 3 = 5\frac{1}{4}$. Выбранный нами на рис. 29 шаг обмотки 1 – 6 является почти диаметральным для обмотки $2p = 12$ и укороченным $K_у = 5 \times 10/63 \approx 0{,}8$) для обмотки $2p = 10$. Числа витков в катушках входящих в разные обмотки, и активное сечение проводов в соответствии с расчетом машины быть различными. Высота катушечной стороны в пазовой части также может быть различной (в пределах, допустимых для монтажа обмотки), но в этом случае шаг катушек по пазам должен быть обязательно нечетным.

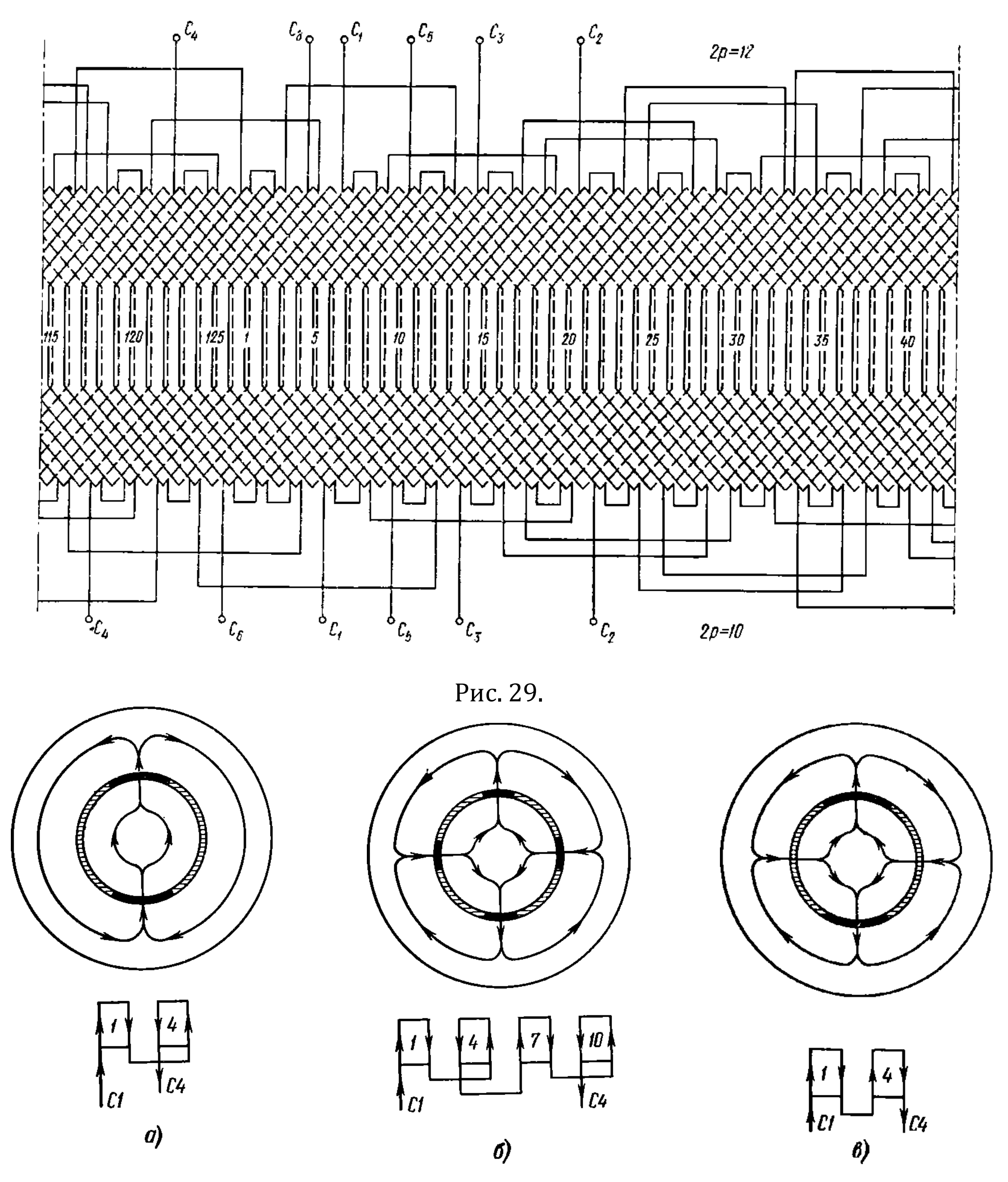


Рис. 29.

Рис. 30. Схемы распределения магнитного потока в статоре асинхронного двигателя.
а – две катушечные группы в фазе при $2p = 2$;
б – четыре катушечные группы в фазе при $2p = 4$;
в – две катушечные группы в фазе при $2p = 4$.

Приведенный на рис. 29 принцип образования двухскоростной обмотки хотя и применяется на практике (двигатели типа ДАЗО на приводах дымососов и др.), но имеет существенный недостаток, заключающийся в нерациональном использовании активных частей машины, так как при работе используется только половина заложенной в машину меди, принудительно существенно увеличены размеры магнитопровода всей машины. Поэтому для подавляющего большинства двухскоростных асинхронных двигателей общепромышленного, назначения применяют однообмоточные схемы с переключением числа полюсов в обмотке чаще всего в отношении 1 : 2. На рис. 30 приведены схемы распределения магнитного потока в статоре асинхронного двигателя в зависимости от числа катушечных групп в фазе обмотки и способа их соединения. На рисунке изображены катушечные группы только фазы I. Аналогичная картина будет иметь место в фазах II и III. На заштрихованных кольцах, условно изображающих обмоточный слой, жирными отрезками дуг отмечены полюсно–фазные зоны фазы I, ширина которых зависит от числа катушечных групп в фазе. Сравнивая рис. 30, *а* и *в*, замечаем, что при определенных условиях (основным из которых является относительное значение шага обмотки по пазам) в зависимости от способа соединения две катушечные группы могут образовать два или четыре полюса. Для изменения числа полюсов в 2 раза направление тока в половине катушечных групп переключается на обратное. Это и является основным принципом изменения полюсности обмотки. Схема, по которой выполняется такое переключение, представлена на рис. 31. Вариант подключения выводов обмотки 2С1, 2С2, 2С3 к питающей сети дает схему звезда, $a_1 = 2$ и соответствует числу полюсов $2p = 2$ (рис. 31, *а*); вариант подключения выводов 4С1, 4С2, 4С3 к питающей сети (рис. 31, *б*) дает схему треугольник, $a_1 = 1$ и соответствует числу полюсов $2p = 4$. Сравнивая направления токов в катушечных группах рис. 31 , *а* и *б*, видим, что в половине катушечных групп (группы 1, 2 и 3) оно изменено на обратное. По рис. 31 построена развернутая схема (рис. 32) двухскоростной обмотки статора с $Z_1 = 36$. В отношении выбора шага катушек по пазам действуют те же рекомендации, которые были приведены для двухобмоточной двухскоростной обмотки.

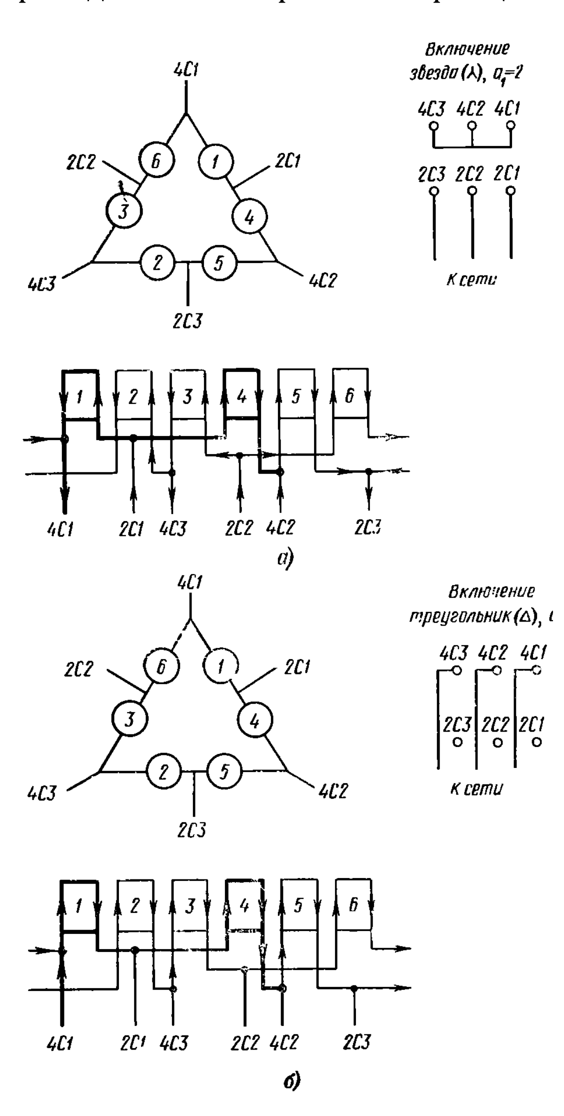


Рис. 31. Схема включения обмотки на разное число полюсов.

При изменении полюсности в отношении 1 : 2 сокращение шага обмотки для большей скорости получается довольно существенным ($К_у$ = 0,5 – 0,6). В связи с этим мощность двигателя на бо́льшей скорости больше мощности двигателя на меньшей скорости только на 35–45%, а не в 2 раза (как скорости). Так, например, серийный асинхронный двигатель типа А81–8/4 при $2p = 8$ имеет мощность 14 *кВт*, а при $2p = 4$ имеет 20 *кВт*.

На рис. 33 приведена более сложная схема однообмоточного двигателя с переключением полюсов 8/4. Для этой схемы при $2p = 8$, $q_1 = 2\frac{1}{4}$; при $2p = 4$, $q_1 = 4\frac{1}{2}$*. Величина q_1 в двухскоростной схеме определяется по тем же формулам, что и односкоростной. Стрелками на линии пазов показано образование полюсно–фазной зоны фазы III при $2p = 4$ (аналогично образуются и полюсно–фазные зоны фаз I и II); они не оплошные и образованы секционными сторонами двух соседних катушечных групп этой фазы. При $2p = 8$ полюсно–фазные зоны сплошные, как и в односкоростных двухслойных обмотках, но в отличие от последних каждая катушечная группа образует две полюсно–фазные зоны: одну верхними, а другую нижними секционными сторонами; что отчетливо видно по фазе I, вычерченной жирными линиями.

*Следует помнить, что значение q_1 в двухслойных обмотках определяется по одному слою – либо по верхнему, либо по нижнему.

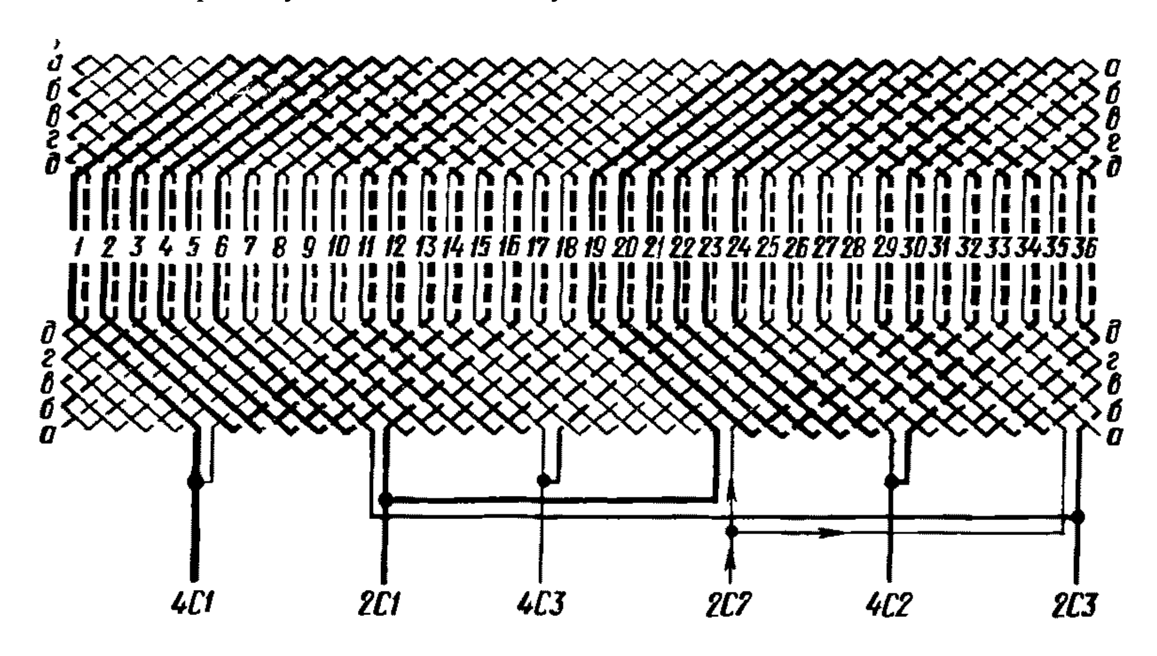


Рис. 32. Развернутая схема двухскоростной обмотки статора, $2p = 4/2$; $Z_1 = 36$.

Существуют также двухскоростные однообмоточные схемы с переключением полюсов не только в отношении 1 : 2, но и в более сложных соотношениях, хотя они применяются значительно реже. Трехскоростные двигатели имеют, как правило, две обмотки: одну с переключением числа полюсов обычно в отношении 1 : 2 и другую нормальную, на одно число полюсов. Четырехскоростные двигатели обычно имеют две обмотки статора, каждая с переключением числа полюсов чаще всего в отношении 1 : 2. В многоскоростных двигателях применяют роторы с короткозамкнутой обмоткой, так как фазный ротор потребовал бы переключения его обмотки с соответствующим изменением числа полюсов, что слишком усложнило бы конструкцию двигателя.

3. Схемы обмоток роторов.

Основным типом обмоток, применяемых в фазных роторах асинхронных двигателей, являются двухслойные волновые обмотки. Схема волновой обмотки ротора четырехполюсного двигателя представлена на рис. 34. Для того чтобы принцип образования схемы обмотки был более ясен, чтобы не загромождать чертеж, на рисунке изображена только фаза I. Две другие фазы, как в этом не трудно убедиться, образуются аналогично фазе I. Основным элементом волновой обмотки является стержень. Эту обмотку часто называют стержневой волновой обмоткой в отличие от катушечных петлевых обмоток, где основным элементом является катушка. В каждый паз ротора укладывается два стержня: нижний и верхний (аналогично катушечным сторонам в пазах статора).

Следовательно, полное число стержней равно удвоенному числу пазов ротора $2 \times Z_2$. В роторе различают числа реальных и элементарных пазов. В реальном пазу может быть уложено несколько активных стержней в каждом слое. В дальнейшем при рассмотрении вопроса составления схем обмоток роторов под числом пазов ротора Z_2 следует понимать число элементарных пазов или число активных стержней в каждом слое ротора. Для составления схемы обмотки ротор разбивается на полюсно–фазные зоны, число которых в каждой фазе обмотки должно быть равно числу полюсов машины $2p$. Число пазов в полюсно–фазной зоне или, что то же самое, число пазов на полюс и фазу ротора q_2 определяется так же, как в схемах обмотки статоров. Для схемы на рис. 34:

$$q_2 = \frac{Z_2}{2p \times m} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

Фаза волновой обмотки состоит из двух ветвей (их также называют полуфазами). Первая ветвь от вывода P_1 (начало фазы) и верхнего стержня 1 делает три обхода (q_2 = 3) по окружности ротора и заканчивается нижним стержнем 26 и выводным концом I. В рассматриваемой схеме три обхода первой ветви фазы I включают стержни:

Первый обход – 1 верх – 10 низ –19 верх – 28 низ;
Второй обход – 36 верх – 9 низ –18 верх – 27 низ;
Третий обход – 35 верх– 8 низ –17 верх – 26 низ.

Начало последующего обхода располагается в пазу соседнем с началом предыдущего обхода. На рис. 34 легко проследить, что первая ветвь обошла все пазы фазы I и образовала четыре ($2p$ = 4) полюсно–фазные зоны; при этом все пазы фазы I оказались занятыми только наполовину: в двух полюсно–фазных зонах по верхнему слою и в двух – но нижнему. Вторая ветвь начинается выводом P_4 (конец фазы) и верхним стержнем 10, делает также три обхода и заканчивается нижним стержнем 35 и выводом IV. Вторая ветвь занимает оставшиеся свободными от первой ветви слои полюсно–фазных зон. Таким образом, все пазы фазы I оказываются заполненными. Соединив выводные концы I и IV (последовательное соединение), получаем в законченном виде фазу I обмотки с началом фазы P_1 и концом P_4.
Выводы двух других фаз, во избежание небаланса при вращении ротора, располагают по окружности ротора геометрически симметрично (под 120 геометрических град.). Исходя из этого, начало второй фазы P_2 следует взять из верхнего стержня паза 13, конец второй фазы P_5, из верхнего стержня паза 22. Соответственно для третьей фазы P_3 – верхний стержень паза 25, P_6 – верхний стержень паза 34. Для нанесения фаз II и Ш обмотки на чертеж схемы достаточно изображенную на чертеже фазу I сдвинуть соответственно вправо и влево на $Z_2/3$= 12 пазов. Исключение составляют обмотки с числом полюсов кратным трем.

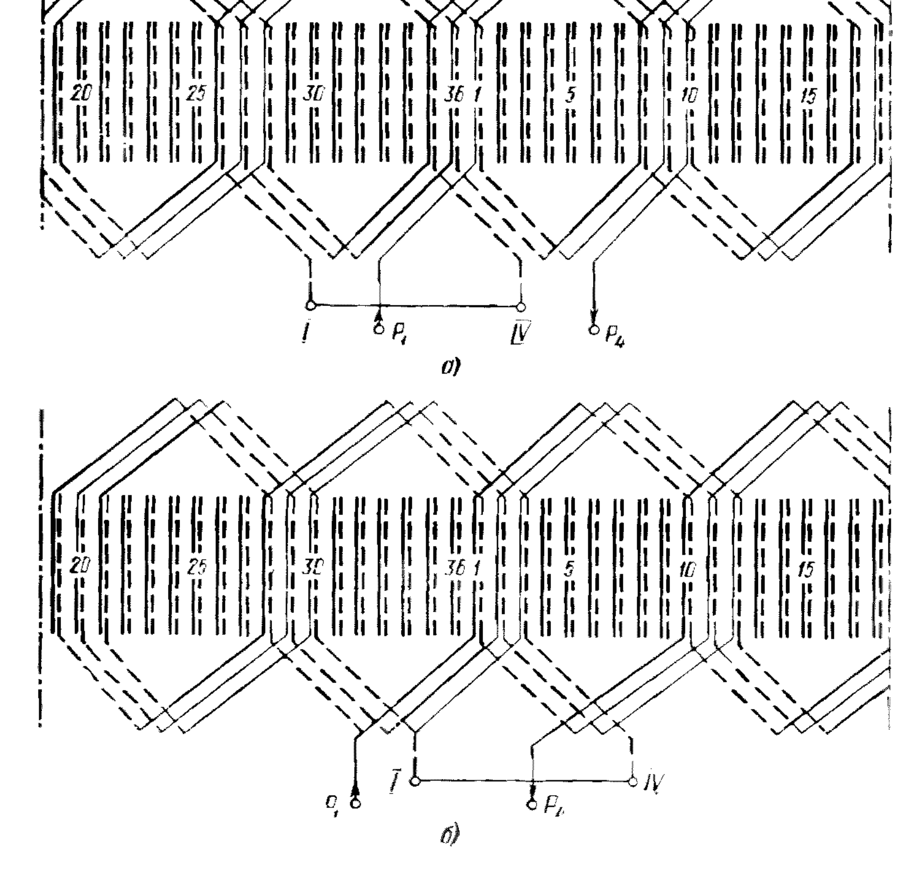


Рис. 34. Развернутая схема волновой обмотки ротора, $2p = 4$; $Z_2 = 36$; $a_2 = 1$;
а – с укороченными переходами; *б* – с удлиненными переходами.

У этих обмоток, как не трудно убедиться, геометрически расположенные симметрично пазы ротора принадлежат полюсно–фазным зонам одной и той же фазы и, поэтому, естественно, не могут быть началами разных фаз. В этом случае начала фаз III и III берут в полюсно–фазных зонах этих фаз: соседней оправа (для фазы II) и соседний слева (для фазы III) от полюсно–фазных зон фазы I, расположенных геометрически симметрично. Этим достигается приблизительно симметричное расположение выводов всех трех фаз по окружности ротора. Поясним это положение по схеме (рис. 35), где размечены полюсно–фазные зоны обмотки ротора с $Z_2 = 72$, $2p = 12$; $q_2 = 2$. В одноименных фазах полюсно–фазные зоны фазы расположены по окружности ротора геометрически симметрично. В схеме волновой обмотки различают следующие обмоточные шаги (рис. 34, *а*):

$y_{П21}$ –первый шаг (1 – 10, равен 9);

$y_{П22}$ – второй шаг (10 – 19, равен 9);

$y_{П2} = y_{П21} + y_{П22}$ – полный шаг (1 – 19, равен 18);

$y_{П2П}$ – переходный шаг (28 – 36, равен 8).

В роторных обмотках, в которых q_2 является целым числом, шаги $y_{п21}$ и $y_{п22}$ выполняют обычно диаметральными: $y_{П21} = y_{П22} = 3 \times q_2$. Следует отметить, что двухслойные волновые стержневые обмотки применяют также в статорах крупных машин, особенно часто в статорах гидрогенераторов. Это объясняется тем, что в многополюсных петлевых обмотках получается большое число межгрупповых соединений (что, собственно и исключает их применение для ротора из–за слишком больших трудностей крепления этих соединений на вращающемся роторе), это вызывает дополнительный расход меди и намного усложняет монтаж обмотки.

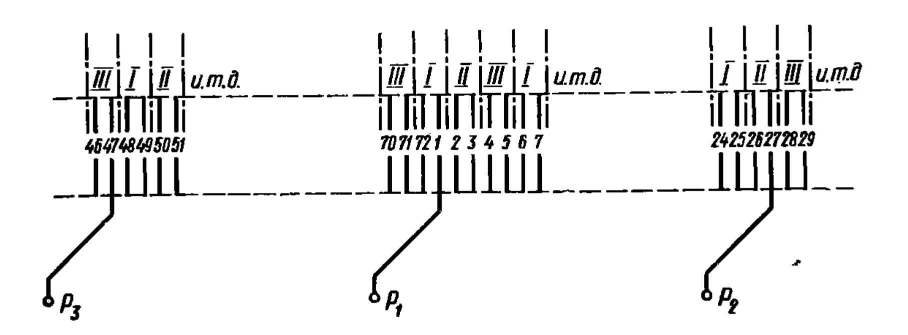


Рис. 35. Расположение выводов фаз обмотки ротора при $2p$ кратном трем.

Но, с другой стороны, в обмотках статоров, особенно генераторов, большое значение имеет сокращение шага обмотки как фактор, влияющий на форму кривой напряжения. Если это необходимо, то и волновая обмотка может быть выполнена с сокращением шага. Например, в схеме на рис. 34 можно было бы первый шаг $y_{п21}$ сделать равным семи (приблизительно 0,8 × τ). Тогда $y_{п22}$ был бы равным 11, так как полный шаг $y_{п2} = y_{п21} + y_{п22}$ в волновых обмотках должен оставаться диаметральным. Таким образом, выигрыша в расходе меди в лобовых частях волновой обмотки при сокращении шага мы не получаем, но эффект влияния на форму кривой поля будет таким же, как и в петлевой обмотке. При ремонте можно встретить волновые обмотки роторов, выполненные некоторыми иностранными фирмами с сокращением первого шага. Переходный шаг $y_{п2п}$, обеспечивающий соединение отдельных обходов, в схеме на рис. 34, *а* меньше нормального второго шага $y_{п22}$ (если $y_{п2п} = y_{п22}$, то обмотка замкнется уже после первого обхода, что недопустимо) и поэтому называется укороченным переходным шагом. Переходный шаг может быть удлиненным, т. е. более нормального шага $y_{п22}$. На рис. 34, *б* изображена фаза I обмотки ротора с теми же параметрами, что и на рис. 34, *а*, но с удлиненным переходным шагом $y_{п2} = 10$. Сравнивая схемы на рис. 34, *а* и *б*, замечаем, что при $y_{п2п}$, укороченном при каждом следующем обходе в каждой полюсно–фазной зоне, смещаемся влево от первых пазов, при $y_{п2п}$ удлиненном – вправо. Кроме того, имеется некоторая разница во взаиморасположении выводных концов полуфаз. В практике выполняют схемы как с укороченными, так и удлиненными переходами. Первые дают некоторую экономию меди в лобовых частях обмотки и более свободное размещение лобовых частей по окружности ротора; вторые имеют некоторые преимущества при производстве ремонта ротора, так как имеют запас меди, обеспечивающий в случае необходимости перевод обмотки с удлиненных на укороченные переходы. Иногда одна полуфаза изготовляется с укороченными переходами, другая с удлиненными, это дает возможность значительно укоротить перемычки между полуфазами и избежать перекрещивания выводов фаз с перемычками, что упрощает конструктивное выполнение и крепление выводов на корпусе ротора.

Таблица 1.

Выводные концы фазы I	№ стержня	
	$y_{п2п}$ – укороченные	$y_{п2п}$ – удлиненные
P_1	1 – верх	1 – верх
I	$Z_2 + 2 - 4q_2$ – низ	$Z_2 - 2q_2$ – низ
P_4	$1 + 3q_2$ – верх	$1 + 3q_2$ – верх
IV	$Z_2 + 2 - q_2$ – низ	q_2 – низ

Примечания: 1. Для фазы II к соответствующим номерам стержней фазы I прибавить $Z_2/3$ при p, не кратном трем, и $Z_2/3 + q_2$ при p, кратном трем.
2. Для фазы III к соответствующим номерам стержней фазы I прибавить $2 \times Z_2/3$ при p не кратном трем, и $2 \times Z_2/3 - q_2$ при p, кратном трем.

Перед тем, как вычертить обмотку ротора, обычно составляют таблицу, где указывают номера верхних и нижних стержней, являющихся выводными концами полуфаз. В табл. 1 приведены расчетные формулы для определения выводных стержней волновой обмотки с целым числом q_2 (см. приложение). В двухслойных волновых обмотках с целым q_2 обе ветви каждой фазы занимают одни и те же пазы, т. е. идентично расположены в магнитном поле машины. Это позволяет легко выполнить две параллельные ветви в фазе. Для этого выводные концы P_1 и IV соединяют перемычкой, отпайка от которой будет началом фазы. Два других выводных конца P_4 и I также соединяют перемычкой, отпайка от которой будет концом фазы. Аналогичные соединения выполняют и в двух других фазах. Соединение фаз обмотки можно выполнить звездой или треугольником, так же как и в статорных обмотках, в зависимости от расчета обмотки. Двухслойные волновые обмотки могут также быть выполнены с дробным числом пазов на полюс и фазу.

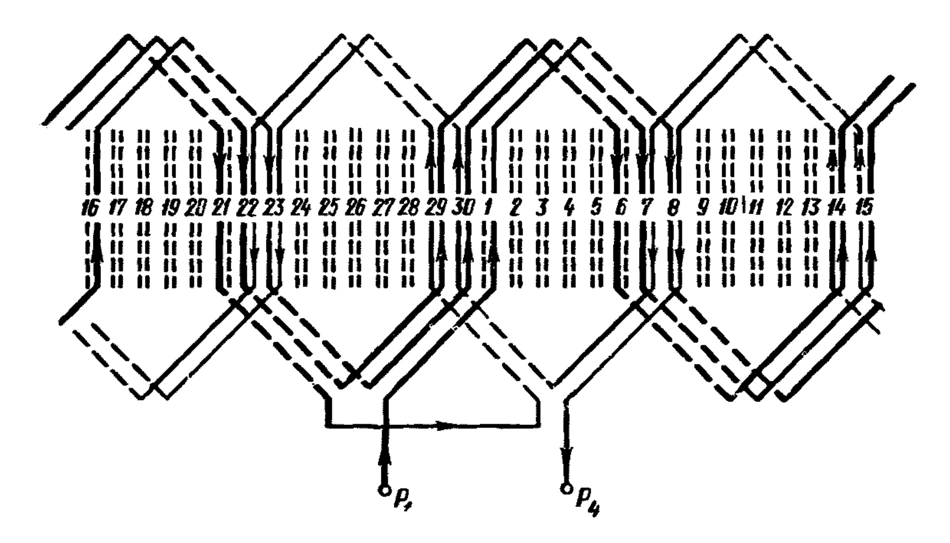


Рис. 36. Схема обмотки ротора с дробным числом пазов на полюс и фазу, $2p = 4$; $Z_2 = 30$; $q_2 = 2½$.

В роторах асинхронных двигателей, как правило, применяют волновые обмотки только с целым числом q_2 или $q_2 = b + ½$. Где b – любое целое число. Волновые обмотки с q, выраженным более сложной дробью, могут быть выполнены только с дополнительными схемными соединениями и применяются в статорах гидрогенераторов. На рис 36 представлена схема двухслойной волновой обмотки ротора с $q_2 = 2½$. Из этого рисунка нетрудно уяснить принцип составления обмотки с $q_2 = b + ½$. Он состоит в следующем:

а) первая ветвь фазы (начинается в верхнем стержне паза 1 – начало фазы P_1) составляется из $b + 1$ обходов;

б) вторая ветвь фазы (начинается в верхнем стержне паза $y_{п21} + 1$ – конец фазы P_4) составляется из b обходов;

в) обмоточные шаги: $y_{п21} = 3 \times q_2 - ½$; $y_{п22} = 3q_2 + ½$; $y_{п2} = 2 \times 3 \times q_2$; $y_{п2п} = 3 \times q_2 - ½$. В остальном составление волновой обмотки с $q_2 = b + ½$ выполняется так же, как и обмотки, где q_2 целое число. Так как $y_{п21} < 3 \times q_2$, то обмотка с дробным q_2 считается выполняемой с сокращением шага. В каждую ветвь обмотки с дробным q_2 входит разное число стержней, поэтому выполнить такую обмотку (в две параллельные ветви) обычным путем невозможно. Если все же необходимо выполнить обмотку при $q_2 = 2½$ с $a_2 = 2$, то поступают следующим образом: в первую параллель включают стержни двух первых обходов и половину стержней третьего обхода первой ветви фазы, а во вторую параллель – оставшиеся половину стержней третьего обхода первой ветви и всю вторую ветвь фазы (два полных обхода); причем такое соединение допускается лишь в обмотках, где число пар полюсов p равно четному числу.

Объясняется это тем, что в такой обмотке стержни третьего обхода, находящиеся в верхнем слое, в магнитном отношении не идентичны стержням, находящимся в нижнем слое, поэтому в каждую параллельную ветвь должно входить одинаковое число верхних и нижних стержней третьего обхода, но число верхних (и нижних) стержней третьего обхода равно p, а в каждую ветвь их должно войти $p/2$. Таким образом, при составлении параллельных ветвей двухслойных волновых обмоток недостаточно включить в каждую параллельную ветвь одинаковое число стержней, но необходимо также, чтобы эти стержни находились в одинаковых магнитных условиях. Это положение используется при выполнении схемы двухслойной волновой обмотки с целым числом q_2 при соединении ее в четыре параллельные ветви. На рис. 37 представлена такая схема со следующими параметрами: $Z_2 = 96$; $2p = 8$; $a_2 = 4$; $q_2 = 4$. Идентичность всех четырех параллельных ветвей обеспечивается включением в каждую параллельную ветвь одинакового числа стержней, находящихся в различных магнитных условиях в каждой полюсно–фазной зоне. Это легко проверить по схеме на рис. 37.

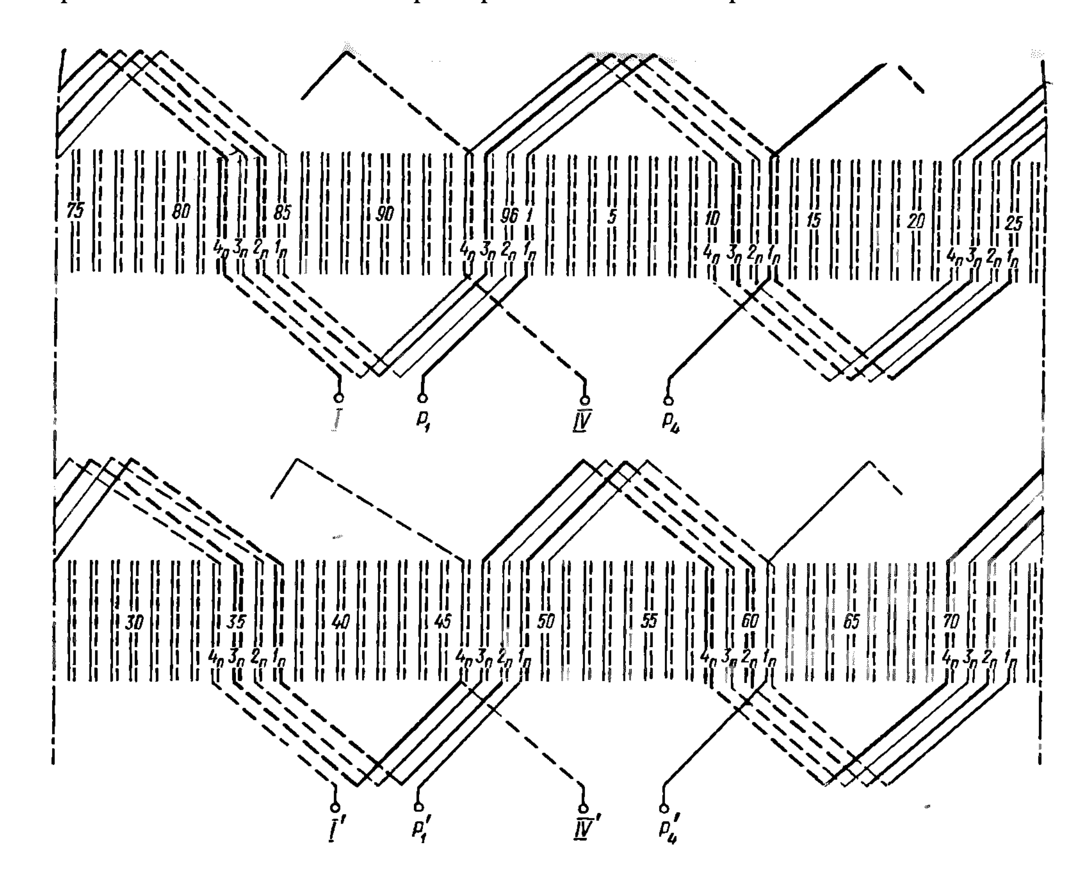


Рис. 37. Схема обмотки ротора, $Z_2 = 96$; $2p = 8$; $a_2 = 4$; $q_2 = 4$.

Если четырем пазам каждой полюсно–фазной зоны присвоить номера $1_п$, $2_п$, $3_п$ и $4_п$, считая справа налево, то стержни, находящиеся в этих пазах, должны быть поровну распределены по всем четырем параллельным ветвям. Так, например (каждая фаза содержит по $2p \times 2 = 16$ стержней каждого типа), одна из четырех параллельных ветвей P_1 – I содержит по четыре стержня каждого типа. То же самое и остальные три параллельные ветви P_4 – IV, P'_1 – I', P_4' – IV' изображенной на рис. 37 фазы I. Достигается это путем применения дополнительных переходных (в данной схеме укороченных) соединений между четвертой и пятой полюсно–фазными зонами, кроме переходных соединений между восьмой и первой полюсно–фазными зонами, которые применяют во всех без исключения волновых обмотках.

Укажем еще на один очень важный момент, связанный с монтажом соединительных шин на вращающемся колесе ротора. На рис. 37 дана схема соединений только для фазы I. Точно столько же этих соединений будет и в двух других фазах. Монтаж и крепление их на одной стороне ротора слишком затруднительны.

В связи с этим применяют различные искусственные приемы выполнения схемы, которые дают возможность расположить схемные соединения на обеих сторонах ротора, а также вообще уменьшить их число. Один из таких искусственных приемов применен в схеме на рис. 38, *а*, на котором изображена одна фаза волновой обмотки с $Z_2 = 36$, $2p = 4$, а также начала и концы двух других фаз. Схема фазы выполнена следующим образом. Первая ветвь фазы P_1 – I начинается в верхнем стержне паза 1 и после трех обходов ($q_2 = 3$) заканчивается нижним стержнем паза 26. Далее, мысленно перевернем чертеж на 180° и вычертим вторую ветвь фазы IV – P_4. Она начинается верхним стержнем паза 26 и после трех обходов заканчивается нижним стержнем паза 1. Для выполнения последовательного соединения полуфаз обмотки выводные концы I и IV должны быть соединены перемычкой. Но в данной схеме их можно соединить и внутри паза, так как стержни, идущие к этим выводным концам, располагаются в одном и том же пазу 26. Осуществляется такое соединение с помощью так называемого "косого" стержня (рис. 38, *б*), который переходит внутри паза из нижнего слоя в верхний. В результате (при сравнении со схемой на рис. 34) в полученной схеме отсутствуют внутрифазные перемычки и выводы фаз обмотки располагают с обеих сторон ротора. В ремонтной практике иногда встречаются крупные (мощностью порядка 1000 *кВт*) асинхронные двигатели иностранных фирм с однослойной волновой обмоткой ротора.

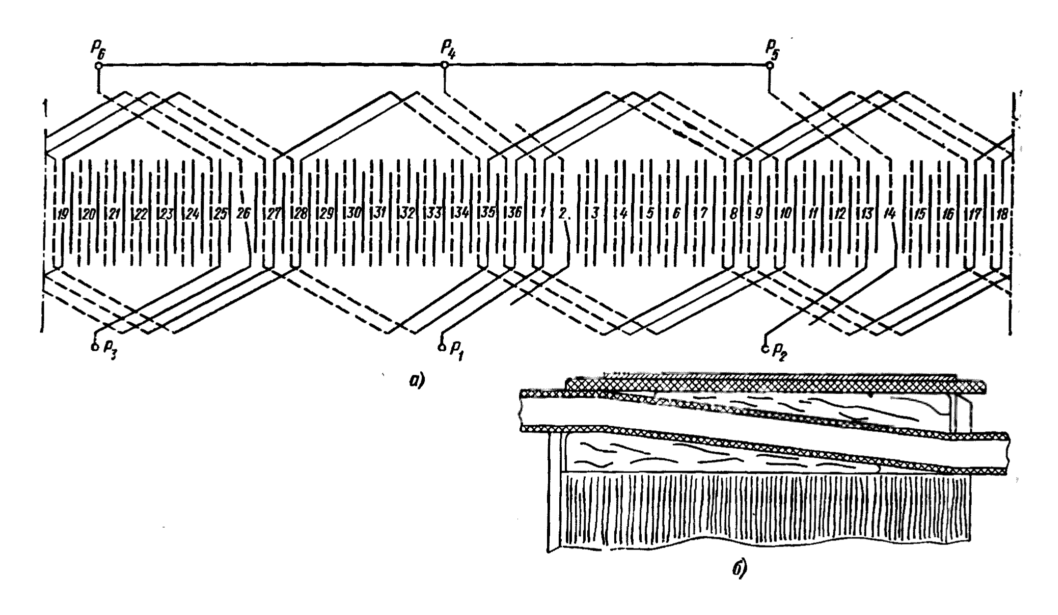


Рис. 38. Схема обмотки ротора.
$Z_2 = 36$; $2p = 4$; $a_2 = 1$; с применением "косого" (переходного) стержня
а – схема соединения, *б* – расположения "косого" стержня в пазу.

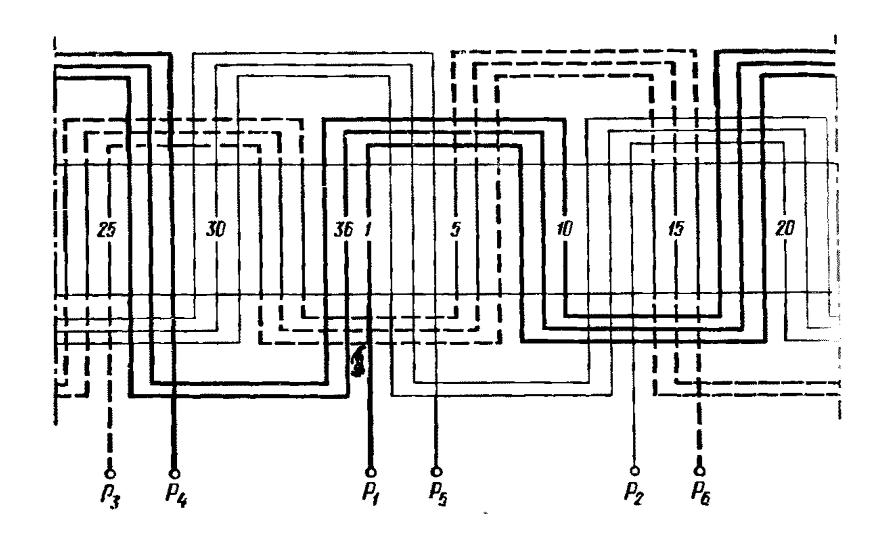


Рис. 39. Схема однослойной волновой обмотки, $2p = 4$; $Z_2 = 36$; $a_2 = 1$.

На рис. 39 на примере схемы с $2p = 4$; $Z_2 = 36$; $a_2 = 1$. показан принцип выполнения однослойной волновой обмотки. Обмотка комплектуется из прямых стержней и приставных лобовых дуг с хомутиками на концах, с помощью которых осуществляется соединение дуг со стержнями. Лобовые дуги располагают в двух плоскостях (аналогично лобовым соединениям однослойной концентрической обмотки статора). Как видно из схемы на рис. 39, для выполнения обмотки заготавливают три вида стержней. Короткие (стержни 8, 9 и 10 фазы I), соединяемые с обоих концов лобовыми дугами первой плоскости. Длинные (стержни 26, 27, 28 фазы I), соединяемые с обоих концов лобовыми дугами второй плоскости. Средние (стержни 35, 36, 1, 17, 18, 19 фазы I), соединяемые с одной стороны лобовыми дугами первой плоскости, с другой – второй плоскости. В фазах II и III также содержится по три коротких, три длинных и шесть средних стержней. Расчетный шаг обмотки принимается равным диаметральному. В этом параграфе мы ограничились описанием схем обмоток фазных роторов асинхронных двигателей. Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей представляют интерес только с точки зрения конструктивного выполнения беличьих клеток и описаны подробно в [Л. 7].

4. Схемы несимметричных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу.

Выше рассматривались симметричные петлевые обмотки, как с целым, так и с дробным числом пазов на полюс и фазу. В таких обмотках *эдс* всех фаз равны по величине и углы между следующими одна за другой фазами одинаковы. Так, для рассматриваемых трехфазных обмоток звезда фазных *эдс* графически изображена на рис. 40, где лучи (векторы) ОА, ОБ и ОС, представляющие собой суммарные *эдс* фаз А, В и С, равны по величине и сдвинуты между собой на 120°. Эти условия не соблюдаются в несимметричных обмотках с дробным q. Так как не симметрия может вызвать вибрацию машины, шум или увеличение токов, создающих дополнительный нагрев этих обмоток, то их избегают применять при проектировании электрических машин, а используют только в специальных случаях, например для уменьшения числа дорогостоящих штампов на заводе, применяя один и тот же штамп для машин одинакового габарита на разные числа полюсов.

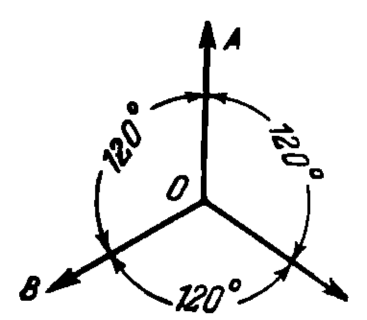


Рис. 40. Звезда фазных э. д. с. трехфазной симметричной обмотки.

Более часто с несимметричными обмотками приходится иметь дело в практике ремонтных цехов при необходимости перемотки двигателей с изменением числа полюсов; например, перемотка четырехполюсного двигателя с $Z_1 = 48$ на шестиполюсный приводит к не симметрии в трехфазной обмотке. Остановимся на этом примере и рассмотрим его сточки зрения существующих условий симметрии трехфазной обмотки. В первом случае, при $2p = 4$:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2p \times m} = \frac{48}{4 \times 3} = 4$$

При целом q_1 трехфазная обмотка всегда симметрична, если число Z_1 кратно трем, т. е. четырехполюсная обмотка с $Z_1 = 48$ симметрична. Во втором случае, при $2p = 6$, при дробном q_1 существует два условия симметрии. Согласно первому условию симметрии число полюсов должно быть кратным знаменателю дроби. В данном примере число полюсов равно шести, следовательно, первое условие выполняется. Согласно второму условию симметрии знаменатель дроби не должен быть кратным числу фаз. В данном примере второе условие не выполняется.

Эта обмотка будет несимметричной, несмотря на то, что в каждую фазу можно включить одинаковое число катушек (по 16). К такому же выводу придем при рассмотрении любой трехфазной обмотки с дробным q_1 при знаменателе дробности, кратном трем (при d, равном 3; 6; 9 и т. д.), т. е. все эти обмотки несимметричны. Рассмотрим принцип составления схем несимметричных трехфазных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу, т. е. способ сведения величины не симметрии к минимуму, при котором явления, свойственные несимметричной обмотке (вибрация машины, шум, увеличенные токи), были бы практически незначительными. Существуют практические критерии оценки степени не симметрии обмотки для двигателей различной мощности и применения. Так, обмотки, имеющие отклонение суммарных векторов *эдс* фаз от идеального направления до 0,5° и разницу в величине этих векторов до 1,5%, практически считаются симметричными. Не симметрия в 2–3° по углу или 2–3% по величине между суммарными *эдс* фаз обмотки считается допустимой для большинства установок, а для небольших двигателей (до 100 *кВт*) разница величины фазных *эдс* может достигать 5% и работа двигателя при этом не будет вызывать опасений. Тем не менее, при составлении схемы несимметричной обмотки всегда необходимо добиваться минимальных отклонений от идеальной звезды фазных *эдс*. Принцип составления несимметричных схем проследим на нашем примере с Z_1 = 48 и $2p$ = 6. Перед тем, как непосредственно перейти к изложению последовательности составления этой схемы, уясним некоторые элементарные положения теории обмоток электрических машин переменного тока. Электродвижущая сила, наводимая в каждой катушке обмотки в данный момент времени, имеет не только определенную величину, но и направление и изображается в системе прямоугольных координат единичным лучом (вектором), причем величина вектора (длина луча) для всех катушек (имеется в виду обмотка с равно–витковыми катушками) одинакова, а направление зависит от их взаимного расположения в магнитном поле обмотки. Таким образом, в обмотке с Z_1 пазами (и следовательно, с Z_1 катушками) существует Z_1 единичных векторов, каждый из которых характеризует *эдс* одной катушки. Вертикальное направление на чертеже вектора катушки 1 (рис. 41, *а*) условимся считать начальным направлением, от которого вправо по часовой стрелке располагаются катушечные векторы всех остальных катушек. Угол α между соседними векторами, изображающими *эдс* соседних катушек, называется пазовым углом и определяется по формуле, град:

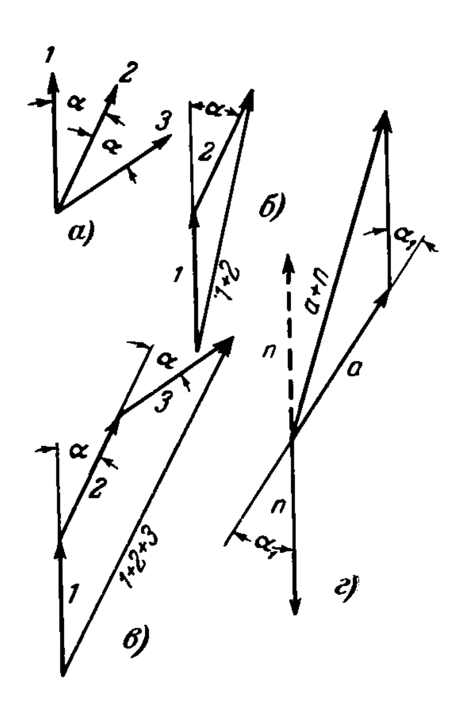


Рис. 41. Сложение векторов *эдс* катушек.

$$\alpha = \frac{180° \times 2p}{Z_1}$$

Так, для разбираемого нами примера:

$$\alpha = \frac{180° \times 6}{48} = 22{,}5°$$

О связи между электрическими и геометрическими градусами мы уже упоминали в начале брошюры. Выразим это соотношение формулой:

$$\alpha = p \times \alpha'$$

где α' – тот же пазовый угол, выраженный в геометрических градусах.

Для нашего примера:

$$\alpha' = \frac{\alpha}{p} = \frac{22{,}5°}{3} = 7{,}5° = 7°30'$$

И действительно, центральный угол между соседними пазами в статоре с Z_1 = 48:

$$\alpha' = \frac{360}{48} = 7{,}5° = 7°30'$$

Один градус состоит из 60 минут обозначаемых ', 0,5° равно соответственно 30 минутам. (30'). Минута состоит из 60 секунд обозначаемых ''.

В дальнейшем изложении все углы будем считать в электрических градусах. Далее, из единичных катушечных векторов образуется суммарный вектор катушечной группы. Сложение катушечных векторов в нашем примере (при q_1 = 2⅔ катушечные группы могут состоять из двух и трех катушек) показано на рис. 41, *б*, *в*. Затем, складывая катушечные векторы, получаем суммарные векторы фаз, образующие звезду фазных *эдс* примерно такого же вида, как это представлено на рис. 40. При сложении векторов катушечных групп или сложении векторов отдельных катушек, находящихся в разных катушечных группах, так же как и в практике соединения катушечных групп в схеме обмотки, могут иметь место случаи соединения конца с началом–тогда сложение векторов производится так же, как показано на рис. 41, *б*, в для катушечных векторов, а также случаи соединения конца с концом или начала с началом–тогда сложение векторов производится так, как показано на рис. 41, *г*. Здесь, как мы видим, направление вектора изменено на обратное, что соответствует действительному направлению *эдс* при соединении катушечных групп одноименными выводами (конец с концом или начало с началом).

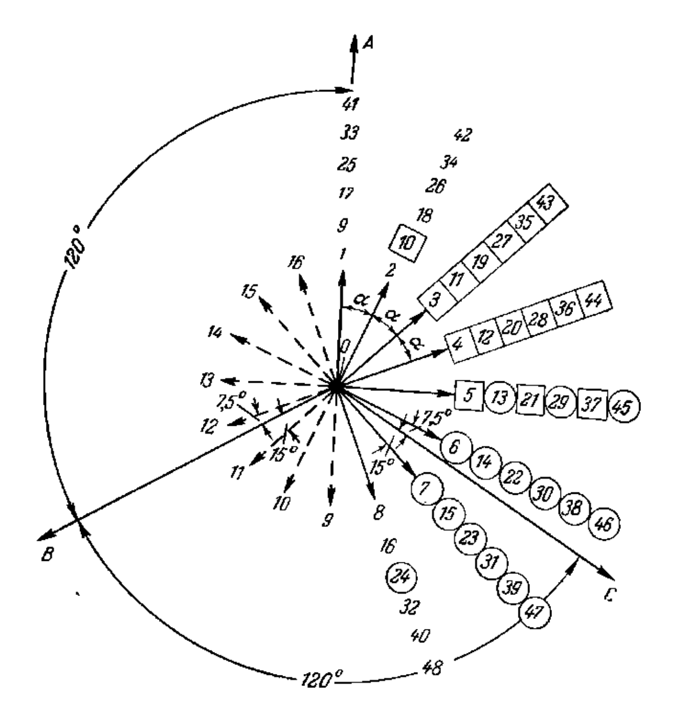


Рис. 42. Звезда пазовых (катушечных) *эдс*.

Составление схемы для нашего примера (Z_1 = 48, $2p$ = 6, q_1 = 2⅔) начнем с построения звезды пазовых (катушечных) *эдс*, которая состоит из катушечных векторов всех катушек обмотки, последовательно сдвинутых на пазовый угол, равный 22°30' (рис. 42). Производя построение, замечаем, что вектор *эдс* катушки 9, будучи согласно вышеприведенному правилу изменен на обратный, полностью совпадает с вектором катушки 1. Вектор катушки 10 также совпадает с вектором катушки 2 и т. д.

В результате для изображения полной звезды катушечных *эдс* оказалось достаточным построить всего восемь векторов, а номера векторов остальных катушек обмотки приписать около соответствующих, совпадающих с ними векторов, как это сделано на рис. 42. Эти восемь векторов иногда называют векторами–представителями, поскольку каждый из них представляет несколько катушек, а все они вместе представляют все катушки данной обмотки. Число векторов–представителей для любой трехфазной обмотки с дробным q_1 при знаменателе дробности d, кратном трем, всегда равно dq_1. Так, в нашем примере q_1 = 2⅔, d = 3, число векторов–представителей $d \times q_1$ = 3 × 2⅔ = 8. Введем еще одно понятие – ряд векторов. Ряд векторов включает все катушечные векторы, соответствующие какому–либо вектору – представителю, и имеет номер этого представителя. Так, например, ряд 3 (рис. 42) состоит из катушечных векторов 3, 11, 19, 27, 35, 43. Для распределения катушек по фазам, на построенную звезду катушечных векторов наложим идеальную трехфазную звезду АВС (рис. 42), имеющую сдвиг между лучами фаз в 120°, совместив при этом луч фазы А с начальным направлением звезды катушечных э. д. с, совпадающим с вектором катушки 1. Производим предварительное распределение рядов векторов по фазам, руководствуясь следующим правилом: к данной фазе относить те ряды, векторы–представители которых имеют отклонение от этой фазы не более чем на 30°. (Разумеется, учитывается как прямое, так и обратное направление вектора.) В соответствии с этим правилом предварительно отнесем к фазе А ряды 1, 2 и 8 (обратное направление ряда 8 совпадает с направлением вектора 16, который сдвинут от луча фазы А на 22,5°); к фазе В – ряды 3, 4; к фазе С – ряды 6 и 7. Оставшийся ряд 5 одинаково отклонен на 30° от фазы С (прямое направление ряда) и от фазы В (обратное направление ряда). Для соблюдения симметрии фаз В и С по отношению к фазе А катушечные векторы ряда 5 поделим пополам между фазами В и С. К каждой из этих фаз можно отнести три катушечных вектора этого ряда, например к фазе В – векторы 13, 29 и 45, а к фазе С–векторы 5, 21 и 37.

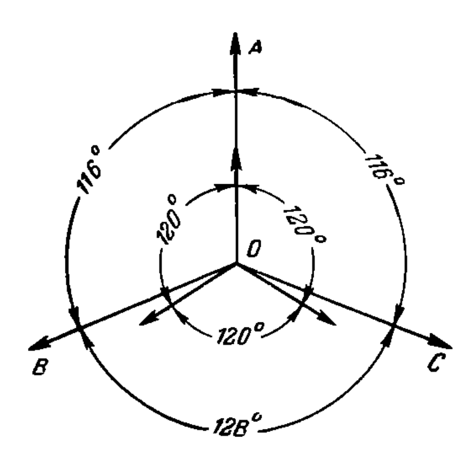


Рис. 43. Предварительная звезда фазных *эдс*.

В итоге после предварительного распределения имеем:

В фазе А 18 катушечных векторов
В фазе В 15 катушечных векторов
В фазе С 15 катушечных векторов

По полученным предварительным данным путем графического сложения векторов приведенным на рис. 41 способом строим звезду фазных *эдс* и для сравнения на этом же чертеже проводим направление лучей идеальной звезды фазных *эдс*, как это показано на рис. 43. Описываемый способ составления схем несимметричных обмоток является графическим, т. е. все интересующие нас величины определяют непосредственным измерением на чертеже.

Поэтому все графические построения следует производить с особой тщательностью и лучше всего на миллиметровой бумаге. Масштаб чертежа необходимо выбрать по возможности более крупным (так, для построений в разбираемом нами примере длину единичного катушечного вектора на чертеже следует взять равной не менее 1 *см*.). При соблюдении этих требований графический способ дает возможность решить задачу с достаточной точностью для практических целей. Произведя соответствующие измерения длин суммарных фазных векторов и углов между ними в предварительной звезде фазных *эдс* (рис. 43), получим следующие данные:

Длина фазного вектора OA = 17 отн. ед.
Длина фазного вектора OB = 14,3 отн. ед.
Длина фазного вектора OC = 14,3 отн. ед.
∟BOC = 128°, ∟AOB = 116°, ∟AOC = 116°,

Разумеется, такая трехфазная система с разницей в 12° по углу и в 16% между длинами фазных векторов не может считаться допустимой. Из сравнения полученной предварительной звезды фазных *эдс* с идеальной системой делаем выводы:
а) предварительная звезда фазных *эдс* симметрична относительно вектора фазы А;
б) вектор фазы А следует укоротить, а фаз В и С соответственно удлинить;
в) ∟BOC следует сузить, повернув векторы В и С по направлению соответствующих лучей идеальной звезды на определенный угол. Но так как при предварительном распределении рядов векторов по фазам в фазу А вошло 18 катушечных векторов, а в фазы В и С по 15, то, естественно, следует из фазы А исключить две катушки и включить их по одной в фазы В и С. Этим мы выполним требование п. "б" вышеприведенных выводов. Этим же действием мы выполняем и требование п. "в", так как любой катушечный вектор рядов 1, 2 и 8, составляющих фазу А, будучи включен в фазу В или С (учитывается как прямое, так и обратное направления этого вектора), т. е. будучи сложен известным нам способом с фазным вектором В или С, произведет поворот этих векторов в требуемом п. "в" направлении. Какие же два вектор следует исключить из фазы А? Не нарушая положения п. "а" вышеприведенных выводов (желательно сохранить симметрию системы относительно вектора фазы А), возможны два варианта подбора векторов, подлежащих исключению из фазы А.
Первый вариант. Оба вектора взять из ряда 1. При этом безразлично, какой из них включить в фазу В, а какой – в фазу С, так как относительное расположение векторов ряда 1 к векторам фаз В и С одинаково.
Второй вариант. Один вектор взять из ряда 2, а второй – из ряда 8. При этом возможны два случая. Первый случай – в фазу В включить вектор из ряда 2, а в фазу С вектор из ряда 8, второй случай – наоборот, в фазу С включить вектор из ряда 2, а в фазу В вектор из ряда 8. Проделав несложные графические построения по первому варианту и произведя измерения, получаем:

Длина фазного вектора OA = 15,1 отн. ед.
Длина фазного вектора OB = 14,8 отн. ед.
Длина фазного вектора OC = 14,8 отн. ед.
∟BOC = 114°, ∟AOB = 123°, ∟AOC = 123°,

Несмотря на вполне благоприятное соотношение длин фазных векторов (разница всего в 2%), этот вариант не приемлем, так как разница между углами в 9° дает степень не симметрии системы, превышающую допустимую. Очевидно, что графических построений для второго случая второго варианта можно и не производить, так как, например, вектор ряда 2 отклонит фазный вектор С на еще больший угол, чем это имело место в первом варианте, когда в фазу С включался вектор из ряда 1. То же самое можно сказать и о фазе В, если в нее включить вектор из ряда 8.

В результате получим систему, в которой ∟BOC будет еще меньше, чем в первом варианте, а степень не симметрии больше.

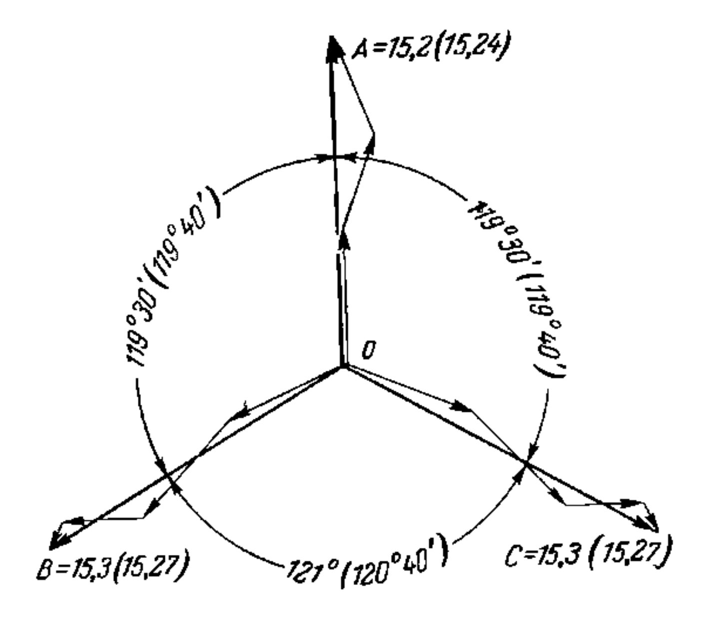


Рис. 44. Построение результирующей звезды фазных *эдс* несимметричной обмотки.
$2p = 6$; $Z_1 = 48$; $q_1 = 2⅔$; $a_1 = l$.

На рис. 44 приведено графическое построение для первого случая второго варианта. При выполнении этого построения на миллиметровой бумаге с масштабом единичного вектора, равным 1 *см.*, измерение длин фазных векторов и углов между ними дает следующие результаты:

Длина фазного вектора OA = 15,2 отн. ед.
Длина фазного вектора OB = 15,3 отн. ед.
Длина фазного вектора OC = 15,3 отн. ед.
∟BOC = 121°, ∟AOB = 119°30', ∟AOC = 119°30',

Схема обмотки, характеризующаяся такой системой векторов, может считаться практически симметричной, так как фазные векторы почти равны по длине (разница около 0,5%), а разница в углах всего 1,5° (при этом наибольшее отклонение фазного вектора от направления луча идеальной трехфазной звезды составляет 0,5°). Проверка этого решения более точным аналитическим методом, исключающим ошибки построения и измерения, дает еще более благоприятные результаты, которые указаны в скобках на рис. 44. Таким образом, мы установили, какие катушечные векторы (или номера катушек по окружности статора) должны быть включены в соответствующие фазы, а именно:

в фазу A	6	катушек ряда	1
	5	катушек ряда	2
	5	катушек ряда	8
в фазу B	6	катушек ряда	3
	6	катушек ряда	4
	3	катушек ряда	5
	1	катушек ряда	2
в фазу C	6	катушек ряда	6
	6	катушек ряда	7
	3	катушек ряда	5
	1	катушек ряда	8

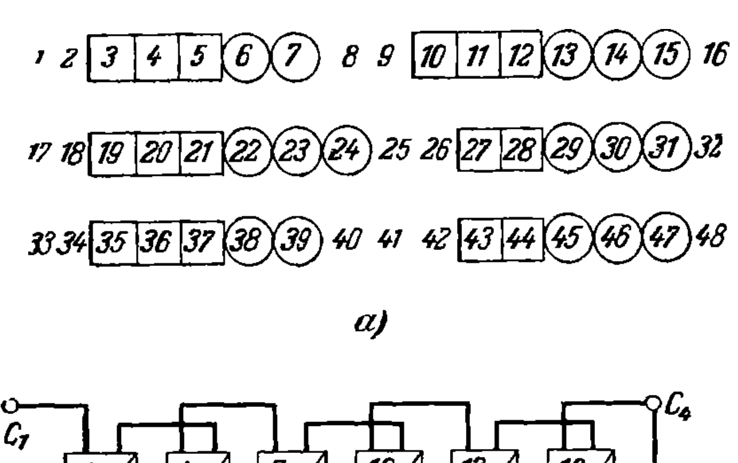
В соответствии с этим распределением на рис. 42 произведены условные обозначения:

Номера катушек фазы А оставлены не обведенными
Номера катушек фазы В обведены квадратиками
Номера катушек фазы С обведены кружками

Как видно из этого рисунка, в фазу В включена из ряда 2 катушка 10. Понятно, что вместо нее могла быть взята любая другая катушка ряда 2 и от этого симметрия схемы нисколько бы не нарушилась. При выборе этой катушки преследовалась цель более равномерного распределения катушек в катушечных группах. Так, например, если бы вместо катушки 10 мы взяли катушку 18 из этого же ряда, то, как видно из рис. 42, рядом лежащие катушки 18, 19, 20 и 21, входящие все в фазу В, должны были бы оказаться в одной катушечной группе, т. е. катушечная группа состояла бы из четырех катушек. Это нежелательно, так как при данном $q_1 = 2⅔$ лучше, если катушечные группы будут только двух и трехкатушечными. Руководствуясь этими соображениями, вместо катушки 10 можно взять катушку 25 или 42 и не следует брать катушки 2, 18 и 34. То же самое можно сказать о выборе катушки 24 из ряда 8 для включения в фазу С. Теперь осталось записать чередование катушечных групп по окружности статора и составить схему обмотки одним из известных нам упрощенных способов. Для этого выпишем все Z_1 номеров катушек обмотки (рис. 45, *а*) и распределим их по фазам в соответствии с диаграммой рис. 42, пользуясь теми же условными обозначениями. В результате получаем следующее чередование катушечных групп по окружности статора:

332233333223332323

Упрощенная схема полученной обмотки при $2p = 6$; $2p = 48$; $q_1 = 2⅔$, $a_1 = 1$ представлена на рис. 45, *б*. Способ построения схемы несимметричной обмотки для разобранного конкретного примера с успехом может быть применен для любой несимметричной схемы петлевой обмотки статора. Следует только оговорить, что в отдельных случаях в процессе построения звезды фазных *эдс* возможны некоторые отступления от тех основных положений, которыми мы пользовались в данном примере. Так, при корректировке первоначальной звезды фазных *эдс* в нашем примере удобно было сохранить направление вектора фазы А совпадающим с начальным направлением звезды катушечных *эдс*. Корректировка звезды фазных *эдс* производилась за счет разворота фазных векторов двух других фаз В и С. При этом мы не нарушали симметрии системы относительно луча фазы А.



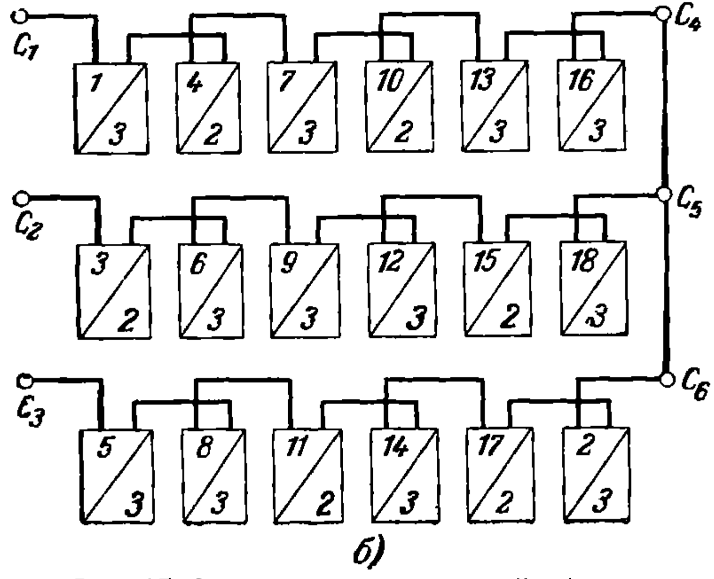


Рис. 45. Схема несимметричной обмотки.
$2p = 6$; $Z_1 = 48$; $q_1 = 2⅔$; $a_1 = 1$.

Вполне возможны случаи, когда от этого принципа целесообразно отступить, т. е. производить корректировку звезды фазных *эдс* за счет поворота на некоторый угол всех трех фазных векторов, если после выполнения графических проб не удалось (в случае сохранения симметрии системы относительно луча фазы А) добиться желаемых результатов. Также не является совершенно обязательным включение в каждую фазу одинакового числа катушек. Вполне допустимы случаи, когда одна из фаз будет содержать на две–три катушки больше или меньше, чем две другие фазы, а звезда фазных *эдс* при этом получится практически симметричной. Для достижения малой (допустимой) степени не симметрии иногда целесообразно вовсе исключить из схемы некоторое число катушек. К этому приему следует относиться весьма осторожно. Исключение большого числа катушек их схемы, если это и приведет к определенным результатам с точки зрения получения практически симметричной системы, все же может резко уменьшить длины фазных векторов, что равносильно снижению мощности машины. Однако существуют заводские исполнения несимметричных обмоток крупных двигателей, в которых исключено из схемы до 5 – 6 % катушек. Иллюстрацией к последним двум положениям может служить рис. 46, на котором изображена результирующая звезда фазных *эдс* несимметричной обмотки статора синхронного двигателя типа ДСК–213/39–36 мощностью 625 *кВт*, напряжением 6000 *в.* и частотой вращения 167,5 *об. мин*.

Приведенная схема с достаточно малой степенью не симметрии получена путем исключения из схемы 10 катушек: двух из фазы А и по четыре из фаз В и С. Таким образом, фаза А имеет на две катушки больше, чем фазы В и С; число удаленных из схемы обмотки катушек составляет 5,5%. Обычно при дробном числе пазов на полюс и фазу ($q_1 = b + c/d$) катушечные группы состоят: малые – из b катушек, большие – из $(b + 1)$ катушек. При составлении схем несимметричных обмоток возможны случаи, когда катушечные группы получаются трех видов и состоят из b, $(b + 1)$ и $(b + 2)$ катушек.

В разобранном выше примере построения несимметричной обмотки на определенном этапе мы сталкивались с такой возможностью получения катушечных групп, состоящих из четырех катушек (при $q_1 = 2⅔$). Мы указывали, что такое формирование катушечных групп не является желательным, и в нашем примере имелась возможность избежать этого без ухудшения конечных результатов. Но в некоторых случаях бывает целесообразно ввести в обмотку несколько катушечных групп, состоящих из (b + 2) катушек, если обычный способ формирования катушечных групп не приводит к желаемым результатам. Далее обратимся к полученному нами при составлении схемы несимметричной обмотки двигателя с $2p = 6$, $Z_1 = 48$ и $q_1 = 2⅔$ чередованию катушечных групп по окружности статора:

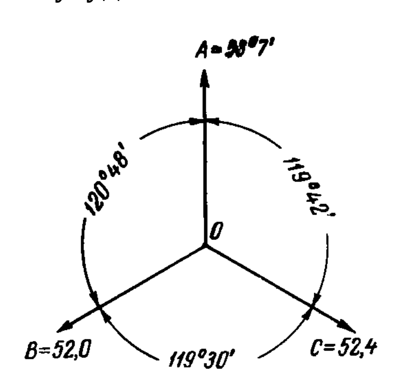


Рис. 46. Звезда фазных *эдс* синхронного двигателя типа ДСК–213/39–36. $2p = 36$; $Z_1 = 180$; $q_1 = 1⅔$.

332233333223332323

Общее число катушек этого ряда составляет 48, т. е. включает все катушки данной обмотки. Легко заметить, что это чередование не имеет периода, что весьма характерно для большинства несимметричных схем машин со сравнительно небольшим числом пазов. Отсутствие периодичности в чередовании катушечных групп указывает на невозможность в данной обмотке образования параллельных ветвей. В случае необходимости образования в несимметричной обмотке параллельных ветвей поступают следующим образом. Если в обмотке должны быть две параллельные ветви, то схема составляется для половинного числа полюсов с участием половинного числа пазов (и катушек) статора при сохранении числа пазов па полюс и фазу. От введения этого условия нисколько не изменяется вид звезды пазовых э. д. с, только число векторов в каждом ряду уменьшится в 2 раза по сравнению с действительным. Вторая половина катушек образует в точности повторяющуюся звезду фазных *эдс*, т. е. вторую параллельную ветвь. И вообще если обмотка должна иметь a_1 параллельных ветвей, то составлению схемы несимметричной обмотки (построение звезды фазных *эдс*) производится только для, $2p/a_1$ полюсов этой обмотки и соответственно для Z_1/a_1 пазов статора. Остальные части обмотки полностью повторяют звезду фазных *эдс*, построенную для первой части обмотки. Разумеется, в данной обмотке возможно образовать a_1 параллельных ветвей только в случае, если числа $2p/a_1$ и Z_1/a_1 будут целыми. Этим приемом деления всей обмотки на несколько частей можно пользоваться и в том случае, когда не требуется образования параллельных ветвей, т. е. для составления полностью последовательной схемы. Разница в результирующих (суммарных) звездах фазных *эдс* всей обмотки будет только та, что при параллельной схеме длины фазных векторов после суммирования фазных векторов всех частей обмотки не увеличиваются, т. е. остаются такими же, какими они были получены при построении первой части обмотки, а при последовательной схеме результирующие фазные векторы получаются длиннее фазных векторов первой обмотки во столько раз, на сколько частей была разбита вся обмотка.

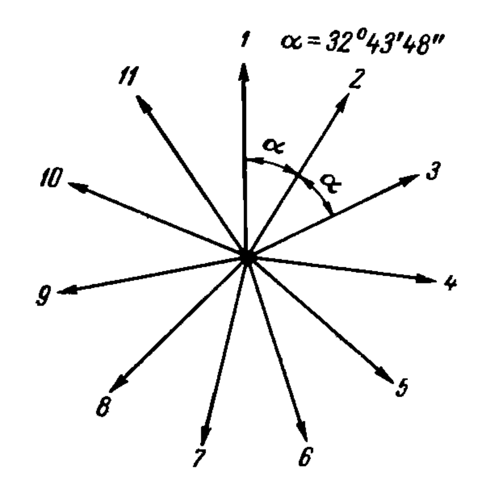


Рис. 47. Звезда фазовых э. д. с несимметричной обмотки. $2p = 36$, $Z_1 = 198$, $q_1 = 1⅚$; $a_1 = 2$.

Приемом деления обмотки на части для образования последовательной схемы обычно пользуются при составлении схем со сравнительно большим числом Z_1 (более 120), с тем, чтобы часть обмотки, выделенная для построения звезды фазных э. д. с, включала достаточное число катушек (векторов) для осуществления искусственных приемов симметрирования системы.

Разумеется, чем больше катушек (катушечных векторов) участвует в построении, тем больше возможностей добиться минимальной не симметрии системы. Но, с другой стороны, при слишком большом числе катушек усложняются графические и вычислительные операции, в то время, как и при меньшем числе катушечных векторов, бывает возможным добиться вполне устраивающей, допустимой не симметрии обмотки. Приведенные соображения всегда следует учитывать при составлении схем несимметричных обмоток е определенными требованиями в отношении степени допустимой не симметрии. На рис. 47 представлена звезда фазных *эдс* несимметричной обмотки ($2p = 36$, $Z_1 = 198$, $q_1 = 1\frac{5}{6}$). Число векторных рядов (равное числу векторов–представителей) данной обмотки по общему правилу равно:

$$d \times q_1 = 1\tfrac{5}{6} \times 6 = 11$$

Соответственно пазовый угол:

$$\alpha = \frac{180° \times 2p}{Z_1} = \frac{180° \times 36}{198} = 32°43'48''$$

Для образования двух параллельных ветвей разделим эту обмотку на две равные части; тогда в графических построениях будут участвовать не все 198 катушек данной обмотки, а только 99, которые распределяются по векторным рядам следующим образом:

Ряд 1– катушки	1, 12, 23, 34, 45, 56, 67, 78, 89
Ряд 2 – катушки	2, 13, 24, 35, 46, 57, 68, 79, 90
……………….	………………………………
……………….	………………………………
Ряд 11 – катушки	11, 22, 23, 44, 55, 66, 77, 88, 99

Решив задачу для первой половины обмотки, получим результирующую звезду фазных *эдс* и чередование катушечных групп первой половины обмотки по окружности статора. Очевидно, что из второй половины обмотки включающей катушки с номерами 100 по 198, может быть получена точно такая же звезда фазных *эдс* и чередование катушечных групп по окружности статора, т. е. образована вторая параллельная ветвь. При выборе способа соединения фаз несимметричных обмоток следует избегать соединения их в треугольник, особенно в обмотках со сравнительно большой (хотя и допустимой) степенью не симметрии, так как при этом могут возникать значительные уравнительные токи, увеличивающие нагрев обмотки. Кроме разобранного графического способа построения схем несимметричных обмоток существуют также способы табличный и аналитический. Аналитический способ по сравнению с графическим более точен с точки зрения определения конечных величин–длин фазных векторов и углов между ними, так как расчеты дают более точные результаты, чем измерения. Но с точки зрения решения существа задачи, т. е. распределения катушек в катушечные группы и формирования самой обмотки, результаты, получаемые аналитическим способом, практически не отличаются от таковых при графическом способе. С другой стороны, графический способ более прост, нагляден и требует от исполнителя самой элементарной математической подготовки, в то время как аналитический требует более глубоких знаний математики.

Табличный способ основан на определении чередования катушечных групп по окружности статора по специальным таблицам, составленным для различных значений чисел $2p$ и дробной части числа q_1. Решение задачи этим способом, конечно, занимает меньше времени, чем аналитическим или графическим, но, к сожалению, не всегда приводит к желаемым результатам. Это объясняется тем, что различные значения целой части числа q_1 все–таки требуют принципиально различного распределения катушек по катушечным группам, в то время как табличный способ основан на аналогичном распределении катушек по группам для обмоток с различными значениями целой части числа q_1 (например, для $q_1 = 1\frac{2}{3}$ и $q_1 = 3\frac{2}{3}$). Так, произведенной проверкой установлено, что некоторые несимметричные схемы, составленные табличным способом, имеют степень не симметрии около 10%. Таким образом, пользоваться этим способом для составления ответственных схем с требованием минимально возможной для данной обмотки степени не симметрии не рекомендуется. Более подробно с табличным способом составления схем несимметричных обмоток можно познакомиться в [Л. 5]. В заключение приведем два примера определения степени не симметрии обмотки.

Пример 1. Звезда фазных *эдс* (рис. 44):

а) не симметрия по углу (наибольшее отклонение фазового угла от 120° составляет: ∟BOC= 120°40')

$$\frac{120{,}66^\circ - 120^\circ}{120^\circ} \times 100\% = 0{,}55\%$$

б) не симметрия по длине фазных векторов:

$$\frac{15{,}27 - 15{,}24}{\frac{15{,}27 + 15{,}24}{2}} \times 100\% = 0{,}2\%$$

Пример 2. Звезда фазных *эдс* (рис. 46):

а) не симметрия по углу (наибольшее отклонение фазового угла от 120° составляет: ∟AOB= 120°48')

$$\frac{120{,}8^\circ - 120^\circ}{120^\circ} \times 100\% = 0{,}67\%$$

б) не симметрия по длине фазных векторов (определяется по наибольшей разнице между длинами фазных векторов):

$$\frac{53{,}7 - 52{,}0}{\frac{53{,}7 + 52{,}0}{2}} \times 100\% = 3{,}2\%$$

5. Схемы двухслойных обмоток с не равновитковыми катушками.

При расчете электрической машины, и в частности ее обмотки, может оказаться что необходимый магнитный поток машины получается при катушках с неодинаковым числом последовательно соединенных витков. Для однослойной обмотки такой случай не требует каких–либо специальных приемов составления схемы. Просто каждая катушечная группа будет содержать катушки с различным числом витков; шаги катушек по пазам и укладка их в пазы ничем не будут отличаться от нормальных случаев с равновитковыми катушками. При составлении схем двухслойных обмоток с не равновитковыми катушками необходимо придерживаться определенных правил. Обычно одну половину комплекта катушек изготовляют с одним числом витков, а другую половину – с числом витков на один или два большим.

Последнее зависит от способа расположения эффективных витков в пазовой части

катушек. В так называемых одностолбиковых катушках, в которых по ширине паза лежит один эффективный проводник, разновитковые катушки будут отличаться на один виток; в двухстолбиковых катушках, в которых по ширине паза лежат два эффективных проводника, разновитковые катушки будут отличаться на два витка. Схемы расположения витков в одно– и двухстолбиковых катушках показаны на рис. 48.

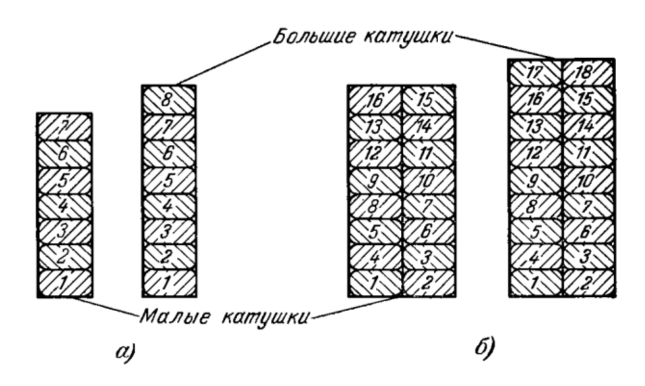


Рис. 48. Расположение витков в одностолбиковых (*а*) и двухстолбиковых (*б*) катушках.

Так, например, в результате электромагнитного расчета машины с двухслойной обмоткой статора при $Z_1 = 24$, $2p = 4$ и $m = 3$ полное число эффективных проводников фазы Nф получилось равным 60. Это значит, что число эффективных проводников в пазу:

$$N\text{п} = \frac{N\text{ф} \times 2 \times m}{Z_1} = \frac{60 \times 2 \times 3}{24} = 15$$

Так как число катушек двухслойной обмотки равно числу пазов, т. е. в данном случае 24, то половина катушек – 12 шт. должны быть выполнены семивитковыми, а другая половина – восьмивитковыми; при этом расположение эффективных проводов следует выбрать в один столбик (рис. 48, *а*). Другой пример: для обмотки с теми же основными параметрами полное число эффективных проводников фазы получилось равным 136. Тогда:

$$N\text{п} = \frac{136 \times 2 \times 3}{24} = 34$$

В этом случае можно было бы изготовить обмотку с равновитковыми катушками, состоящими из 17 витков расположенных один под другим по одностолбиковой схеме (рис. 48, *а*). Основываясь на практическом опыте изготовления катушек с большим числом витков (при $wk > 15$), весьма часто приходится отказываться от одностолбикового исполнения катушек, так как при этом получается слишком большой суммарный размер витковой изоляции по высоте столбика. При двухстолбиковом исполнении (рис. 48, *б*) для нашего примера должны получиться катушки с 16 и 18 витками.

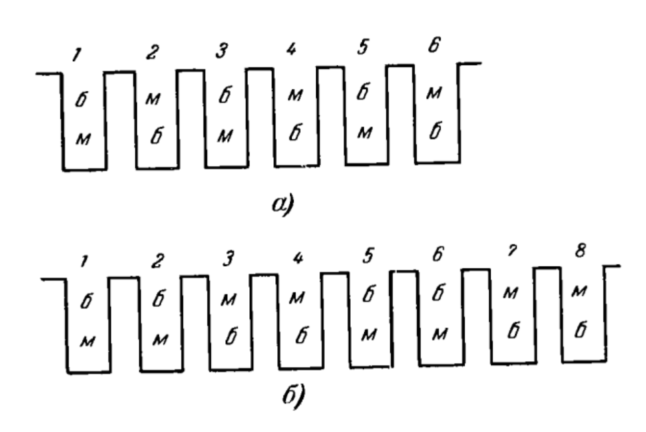


Рис. 49. Расположение не равновитковых катушек в пазах статора.
м – малые катушки; *б* – большие катушки.

С точки зрения выбора шага катушки по пазам и составления схемы обмотки безразлично, на какое число витков (один или два) отличаются катушки. Поэтому при дальнейшем изложении материала этого раздела мы будем называть катушки с большим числом витков большими (*б*), а катушки с меньшим числом витков– малыми (*м*), вне зависимости от того, являются ли они одно– или двухстолбиковыми. Из приведенных выше примеров, определяющих число эффективных проводников в пазу, следует, что в каждый паз должны быть помещены по одной катушечной стороне большой и малой катушек. Для выполнения этого требования во всех пазах необходимо наличие определенных условий. Ниже мы рассмотрим несколько случаев образования симметричной двухслойной обмотки с не равновитковыми катушками. Наиболее простой и весьма часто встречающийся случай– поочередное расположение больших и малых катушек–показан на рис. 49, *а*. Число пазов статора Z_1 при этом обязательно должно быть четным (и конечно, кратным трем, как вообще для любой симметричной трехфазной обмотки), так как число больших и малых катушек должно быть одинаковым. Но так как для трехфазной обмотки $Z_1 = 6 \times p \times q_1$, то Z_1 будет четным, если $p \times q_1$ – целое число.

Фазы → I II III I II III I II III I II III
б м | б м | б м | б м | б м | б м | б м | б м | б м | б м | б м | б м
а)

б б | м м | б б | м м | б б | м м | б б | м м | б б | м м | б б | м м
Номер катушечной группы → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
б)

Рис. 50. Схема обмотки с не равновитковыми катушками.

Как видно из рис. 49, *а*, верхние стороны больших катушек занимают все нечетные пазы, а нижние стороны тех же больших катушек–четные пазы, т. е. шаг катушки должен быть обязательно нечетным (в нашем примере он равен пяти). В противном случае в одном пазу встретятся две стороны больших катушек, что технологически невыполнимо. Если необходимо уложить не равновитковые катушки с четным шагом (например, 1 – 5, шаг равен четырем), то применяют попарный способ укладки, при котором большие и малые катушки чередуются попарно, как это показано на рис. 49, *б*. Для этого способа укладки число Z_1 должно быть кратно четырем, так как каждой паре больших катушек должна соответствовать пара малых катушек. Таким образом, для этого способа $Z_1 = 6 \times p \times q_1$ – кратное четырем или $p \times q_1$ – четное число, т. е. для обмоток с целым числом q_1 обязательно должно быть четным одно из чисел p или q_1.
Рассмотрим процесс образования параллельных ветвей в обмотках с не равновитковыми катушками. Напомним, что при формировании параллельных ветвей непременным условием является включение одинакового числа идентичных катушечных групп в каждую параллельную ветвь данной фазы. Введем условные изображения схем двухслойных обмоток с не равновитковыми катушками, заключающиеся в том, что нижние стороны катушек располагаются в таком же порядке, как и верхние, поэтому в дальнейшем достаточно рассматривать расположение только одних верхних сторон. В соответствии с этим условием и составлена изображенная на рис. 50 схема обмотки с не равновитковыми катушками при $Z_1 = 24$ и $2p = 4$ для нечетного шага, равного пяти (рис. 50, *а*), и для четного, равного четырем (рис. 50, *б*). Как видно из

рис. 50, *а*, все катушечные группы получились одинаковыми, содержащими по одной большой и одной малой катушке. Следовательно, образование параллельных ветвей для такой обмотки ничем не отличается от такового при нормальной двухслойной обмотке с целым числом пазов на полюс и фазы, т. е. должно соблюдаться условие: $2p/a_1$ равно целому числу, и вообще этому условию подчиняется любая не равнокатушечная обмотка с поочередным расположением больших и малых катушек, если q_1 будет целым четным числом. В схеме на рис. 50, *б* с попарным чередованием больших и малых катушек при четном шаге обмотки из четырех катушечных групп, входящих в каждую фазу, две катушечные группы составлены из больших катушек (например, группы 1 и 7 фазы I) и две катушечные группы–из малых катушек (группы 4 и 10 фазы I). Следовательно, возможности образования параллельных ветвей по сравнению со схемой на рис. 50, *а* в этом случае уже более ограничены и выражаются условием: p/a_1 равно целому числу, и вообще этому условию подчиняется любая не равновитковая обмотка с попарным чередованием больших и малых катушек, если $q_1/2$ будет целым нечетным числом. Если $q_1/2$ будет целым четным числом, то условие образования параллельных ветвей будет таким же, как и для обмотки с поочередным расположением больших и малых катушек при целом и четном q_1. Для нечетного числа катушек в катушечной группе при поочередном расположении больших и малых катушек, как это видно из рис. 51, *а* (q_1= 3) и рис 51, *б* $(q_1 + 1) : 2$ больших и $(q_1 – 1) : 2$ малых катушек, а все четные катушечные группы любой фазы состоят из $(q_1 + 1) : 2$ больших и $(q_1 – 1) : 2$ малых катушек, а все четные группы – из $(q_1 + 1) : 2$ малых и $(q_1 – 1) : 2$ больших. Следовательно, максимально возможное число параллельных ветвей уменьшится вдвое против такового в нормальной равнокатушечной обмотке и будет определяться условием: p/a_1 равно целому числу. На рис. 52 показано формирование катушечных групп из больших и малых катушек при попарном чередовании последних при $q_1 = 3$ (рис 52, *а*) и $q_1 = 5$ (рис 52, *б*) для обмотки с любым числом полюсов. При сравнении состава катушечных групп, например, фазы I замечаем, что группы 1, 4, 7 и 10, принадлежащие этой фазе, все разные. Например, при $q_1 = 5$ группы 1 и 10 состоят из трех больших катушек и двух малых, а группы 4 и 7, наоборот, из двух больших и трех малых. Группы 1 и 10, так же как и группы 4 и 7, отличаются относительным расположением больших и малых катушек внутри фазной зоны, поэтому суммарные *эдс* катушечных групп 1 и 10, так же как и групп 4 и 7, будут разные (об относительном расположении катушек в фазной зоне и направлении *эдс* отдельных катушек изложено в §4), поэтому из групп 1, 4, 7 и 10 нельзя образовать параллельные ветви. И только группа 13 фазы I точно повторяет по числу больших и малых катушек и их относительному расположению внутри фазной зоны группы 1. Следующая катушечная группа 14, принадлежащая фазе II, является идентичной группе 2 этой же фазы и т. д. Таким образом, в общем случае для нечетного q_1 при попарном чередовании больших и малых катушек:

а) идентичные катушечные группы расположены через 12 групп;

б) в каждой фазе имеется по четыре вида различных катушечных групп.

Отсюда следует, что максимально возможное число параллельных ветвей в такой обмотке определяется отношением $2p/4$, а возможность выполнения обмотки с a_1 параллельных ветвей определяется условием: p/a_1 равно четному числу.

Все рассмотренные выше случаи образования параллельных ветвей в обмотке с не равновитковыми катушками относились к целому числу пазов на полюс и фазу. Если же число q_1 будет дробным, то возможности образования параллельных ветвей еще более ограничены. Мы не будем подробно рассматривать эти случаи, так как они не часто встречаются в практике, но укажем, что для попарно чередующейся обмотки $q_1 = 1½$ (или для любого q_1 со знаменателем дробности, равным двум) при образовании параллельных ветвей должно быть выполнено условие: $p/4 \times a_1$ равно целому числу. Из этого условия, например, следует, что минимальное число полюсов машины, при котором возможно образовать две параллельные ветви, равно 16. Следует заметить, что не равновитковые катушки с малым числом витков (2 и 3, 3 и 4) требуют специальной

конфигурации лобовых частей, обеспечивающей необходимый изоляционный зазор в лобовых частях обмотки при укладке катушек.

Фазы → I II III I II III I II III I

| б м б | м б м | б м б | м б м | б м б | м б м | б м б | м б м | б м б | м б м |

а)

| бмбмб | мбмбм | бмбмб | мбмбм | бмбмб | мбмбм | бмбмб | мбмбм | бмбмб | мбмбм |

Номер катушечной группы → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

б)

Рис. 51. Образование параллельных ветвей при нечетном q_1
и поочередном способе укладки катушек.

Фазы → I II III I II III I II III I II III I

| б б м | м б б | м м б | б м м | б б м | м б б | м м б | б м м | б б м | м б б | м м б | б м м | б б м |

а)

| ббммб | бммбб | ммббм | мббмм | ббммб | бммбб | ммббм | мббмм | ббммб | бммбб | ммббм | мббмм | ббммб |

Номер катушечной группы → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13

б)

Рис. 52. Образование параллельных ветвей при нечетном q_1
и попарно чередующемся способе укладки катушек.

Расположение выводов и внутрифазных перемычек в схемах волновых обмоток роторов при последовательном соединении в фазе.
Z_2 – число пазов, q_2 – пазов на полюс и фазу, $y_{п21}$ – первый шаг,
$y_{п22}$ – второй шаг, $y_{п2п}$ – переходной шаг.

Z_2	q_2	$y_{п21}$	$y_{п22}$	$y_{п2п}$	верхние стержни						нижние стержни		
					начала фаз			концы фаз			внутрифазовые соединения		
					P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	I–IV	II–V	III–VI
	$2p = 2$												

24	4	12	12	13	1	9	17	13	21	5	16–4	24–12	8–20
24	4	12	12	11	1	9	17	13	21	5	10–22	18–16	2–14
30	5	15	15	16	1	11	21	16	26	6	20–5	30–15	10–25
30	5	15	15	14	1	11	21	16	26	6	12–27	22–7	2–17
36	6	18	18	19	1	13	25	19	31	7	24–6	36–18	12–30
36	6	18	18	17	1	13	25	19	31	7	14 32	26–8	2–20
42	7	21	21	22	1	15	29	22	36	8	28–7	42–21	14–35
42	7	21	21	20	1	15	29	22	36	8	16–37	30–9	2–23
45	7½	22	23	22	1	16	31	23	38	8	16–39	31–9	1–24
48	8	24	24	25	1	17	33	25	41	9	32–8	48–24	16–40
48	8	24	24	23	1	17	33	25	41	9	18–42	34–10	2–26
54	9	27	27	28	1	19	37	28	46	10	36–9	54–27	18–45
54	9	27	27	26	1	19	37	28	46	10	20–47	38–11	2–29
60	10	30	30	31	1	21	41	31	51	11	40–10	60–30	20–50
60	10	30	30	29	1	21	41	31	51	11	22–52	42–12	2–32
66	11	33	33	34	1	23	45	34	56	12	44–11	65–33	22–55
66	11	33	33	32	1	23	45	34	56	12	24–57	46–13	2–35
72	12	36	36	37	1	25	49	37	61	13	48–12	72–36	24–60
72	12	36	36	35	1	25	49	37	61	13	26–62	50–14	2–38
75	12½	37	38	37	1	26	51	38	63	13	26–64	51–14	1–39
$2p = 4$													
36	3	9	9	10	1	13	25	10	22	34	30–3	6–15	18–27
36	3	9	9	8	1	13	25	10	22	34	26–35	2–11	14–23
42	3½	10	11	10	1	15	29	11	25	39	29–40	1–12	15–26
48	4	12	12	13	1	17	33	13	29	45	40–4	8–20	24–36
48	4	12	12	11	1	17	33	13	29	45	34–46	2–14	18–30
54	4½	13	14	13	1	19	37	14	32	50	37–51	1–15	19–33
60	5	15	15	16	1	21	41	16	36	56	50–5	10–25	30–45
60	5	15	15	14	1	21	41	16	36	56	42–57	2–17	22–37
63	5½	16	17	16	1	23	45	17	39	61	45–62	1–18	23–40
72	6	18	18	19	1	25	49	19	43	67	60–6	12–30	36–54
72	6	18	18	17	1	25	49	19	43	67	50–68	2–20	26–44
78	6½	19	20	19	1	27	53	20	46	72	53–73	1–21	27–47
84	7	21	21	22	1	29	57	22	50	78	70–7	14–35	42–63
84	7	21	21	20	1	29	57	22	50	78	58–79	2–23	30–51
90	7½	22	23	22	1	31	61	23	53	83	61–84	1–24	31–54
96	8	24	24	25	1	33	65	25	57	89	80–8	16–40	48–72
96	8	24	24	23	1	33	65	25	57	89	66–90	2–26	34–58
108	9	27	27	28	1	37	73	28	64	100	90–9	18–45	54–81
108	9	27	27	26	1	37	73	28	64	100	74–101	2–29	38–65
120	10	30	30	31	1	41	81	31	71	111	100–10	20–50	60–90
120	10	30	30	29	1	41	81	31	71	111	82–112	2–32	42–72

Z_2	q_2	$y_{п21}$	$y_{п22}$	$y_{п2п}$	верхние стержни						нижние стержни		
					начала фаз			концы фаз			внутрифазовые соединения		
					P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	I–IV	II–V	III–VI
	$2p = 6$												
54	3	9	9	10	1	13	43	10	22	52	48–3	8–15	С6–45
54	3	9	9	8	1	13	43	10	22	52	44–53	2–11	32–41
63	3½	10	11	10	1	15	50	11	25	60	50–61	1 – 12	36–4 7

72	4	12	12	13	1	17	57	13	29	69	64–4	8–20	48–60
72	4	12	12	11	1	17	57	13	29	69	58–70	2–14	42–54
81	4½	13	14	13	1	19	64	14	32	77	64–78	1–15	46–60
90	5	15	15	16	1	21	71	16	36	86	80–5	10–25	60–75
90	5	15	15	14	1	21	71	16	36	86	72–87	2–17	52–67
99	5½	16	17	16	1	23	78	17	39	94	78–95	1–18	56–73
108	6	18	18	19	1	25	85	19	43	103	96–6	12–30	72–90
108	6	18	18	17	1	25	85	19	43	103	86–104	2–20	62–80
126	7	21	21	22	1	29	99	22	50	120	112–7	14–35	84–105
126	7	21	21	20	1	29	99	22	50	120	100–121	2–23	72–93
135	7½	22	23	22	1	31	106	23	53	128	106–129	1–24	76–99
$2p = 8$													
60	2½	7	8	7	1	21	41	8	28	48	51–59	11–19	31–39
72	3	9	9	7	1	25	49	10	34	58	66–3	18–27	42–51
72	3	9	9	8	1	25	49	10	34	58	62–71	14–23	38–47
84	3½	10	11	10	1	29	57	11	39	57	71–82	19–26	43–54
96	4	12	12	13	1	33	65	13	45	77	88–4	24–36	56–68
96	4	12	12	11	1	33	65	13	45	77	82–94	18–30	50–62
108	4½	13	14	13	1	37	73	14	50	86	91–105	19–33	55–69
120	5	15	15	16	1	41	81	16	56	96	110–5	30–45	70–85
120	5	15	15	14	1	41	81	16	56	96	102–117	22–37	62–77
144	6	18	18	19	1	49	97	19	67	115	132–6	36–54	84 102
144	6	18	18	17	1	49	97	19	67	115	122–140	26–44	74–92
168'	7	21	21	22	1	57	113	22	78	134	154 7	42–63	98–119
168	7	21	21	20	1	57	113	22	78	134	142–163	30–51	86–107
$2p = 10$													
90	3	9	9	10	1	31	61	10	40	70	84–3	24–33	54–63
90	3	9	9	8	1	31	61	10	40	70	80–89	20–29	50–59
105	3½	10	11	10	1	36	71	11	46	81	92–103	22–33	57–68
120	4	12	12	13	1	41	81	13	53	93	112–4	32–44	72–84
120	4	12	12	11	1	41	81	13	53	93	106–118	26–38	66–78
135	4½	13	14	13	1	46	91	и	59	104	118–132	28–42	73–87
150	5	15	15	16	1	51	101	16	66	116	140–5	40–55	90–105
150	5	15	15	14	1	51	101	16	66	116	132–147	32–47	82–97
180	6	18	18	19	1	61	12!	19	79	139	168–6	48–66	108–126
210	7	21	21	22	1	71	141	22	92	162	196–7	56–77	126–147
210	7	21	21	20	1	71	141	22	92	162	184–205	44–65	114–135

Z_2	q_2	$y_{п21}$	$y_{п22}$	$y_{п2п}$	верхние стержни						нижние стержни		
					начала фаз			концы фаз			внутрифазовые соединения		
					P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	I–IV	II–V	III–VI
	$2p = 12$												
90	2½	7	8	7	1	26	66	8	33	73	81–89	16–24	56–64
108	3	9	9	10	1	31	79	10	40	88	102–3	24–33	72–81
108	3	9	9	8	1	31	79	10	40	88	98–107	20–29	68–77

126	3½	10	11	10	1	36	92	11	46	102	113–124	22–33	78–89
144	4	12	12	13	1	41	105	13	53	117	136–4	32–44	96–168
144	4	12	12	11	1	41	105	13	53	117	130–142	26–38	90–102
162	4½	13	14	13	1	46	118	14	59	131	145–159	28–42	100–П4
180	5	15	15	16	1	51	131	16	66	146	170–5	40–55	120–135
180	5	15	15	14	1	51	131	16	66	146	162–177	32–47	112–127
216	6	18	18	19	1	51	157	19	79	175	204–6	48–66	144–162
216	6	18	18	17	1	61	157	19	79	175	194–212	38–56	134–152
252	7	21	21	22	1	71	183	22	92	204	238–7	56–77	168–189
252	7	21	21	20	1	71	183	22	92	204	226–247	44–65	156–177
$2p = 14$													
105	2½	7	8	7	1	36	71	8	43	78	96–104	26–34	61–69
126	3	9	9	10	1	43	85	10	52	94	120–3	36–45	78–87
126	3	9	9	8	1	43	85	10	52	94	116–125	32–41	74–83
147	3½	10	11	10	1	50	9	11	60	109	134–145	36–47	85–96
168	4	12	12	13	1	57	113	13	69	125	160–4	48–60	104–110
168	4	12	12	11	1	57	113	13	69	125	154–166	42–54	98–110
189	4½	13	14	13	1	64	127	14	77	140	172–186	46–60	190–123
210	5	15	15	16	1	71	141	16	86	156	200–5	60–75	130–145
210	5	15	15	14	1	71	141	16	86	156	192–207	52–67	122–137
252	6	18	18	19	1	85	169	19	103	187	240–6	72–90	156–174
52	6	18	18	17	1	85	169	19	103	187	230–248	62–80	146–164
94	7	21	21	22	1	91	197	22	120	218	280–7	84–105	182–203
94	7	21	21	20	1	99	197	22	120	218	268–289	72–93	170–191
$2p = 16$													
96	2	6	6	7	1	33	65	7	39	71	92–2	28–34	60–66
96	2	6	6	5	1	33	65	7	39	71	90–96	26–32	58–64
120	2½	7	7	5	1	41	81	8	48	88	111–119	31–39	71–79
144	3	9	9	10	1	49	97	10	58	106	138–3	42–51	90–99
144	3	9	9	8	1	49	97	10	58	106	134–143	38–47	86–95
168	3½	10	11	10	1	57	113	11	67	123	155–166	43–54	99–110
192	4	12	12	13	1	65	129	13	77	141	184–4	56–68	120–132
192	4	12	12	11	1	65	129	13	77	141	178–190	50–62	114–126
216	4½	13	14	13	1	73	145	14	86	158	199–213	55–69	127–141
240	5	15	15	16	1	81	161	16	96	176	230–5	70–85	150–165
240	5	15	15	14	1	81	161	16	115	176	222–237	62–77	142–157
288	6	18	18	19	1	97	193	19	115	211	276–6	84–102	180–108
288	6	18	18	17	1	97	143	19	115	211	266–284	74–92	170–188

Z_2	q_2	$y_{п21}$	$y_{п22}$	$y_{п2п}$	верхние стержни						нижние стержни		
					начала фаз			концы фаз			внутрифазовые соединения		
					P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	I–IV	II–V	III–VI
	$2p = 18$												
108	2	6	6	7	1	33	77	7	39	83	104–2	28–34	72–78
108	2	6	6	5	1	33	77	7	39	83	102–108	26–32	70–76
135	2½	7	8	7	1	41	96	8	48	103	126–134	31–39	86–94

162	3	9	9	10	1	49	115	10	58	124	156–3	42–51	108–117
162	3	9	9	8	1	49	115	10	58	124	152–161	38–47	104–113
189	3½	10	11	10	1	57	134	11	67	144	176–187	43–54	120–131
216	4	12	12	13	1	65	153	13	77	165	208–4	56–68	144–151
216	4	12	12	11	1	65	153	13	77	165	202–214	50–62	138–150
243	4½	13	14	13	1	73	172	14	86	185	226–240	55–69	154–168
270	5	15	15	16	1	81	190	16	96	206	230–5	70–85	180–195
270	5	15	15	14	1	81	190	16	96	206	252–267	62–77	172–187
$2p = 20$													
120	2	6	6	7	1	41	81	7	47	87	116–2	36–42	76–82
120	2	6	6	5	1	41	81	7	47	87	114–120	34–40	74–80
150	2½	7	8	7	1	51	101	8	58	108	141–149	41–49	91–99
180	3	9	9	10	1	61	121	10	70	130	174–3	54–63	114–123
180	3	9	9	8	1	61	121	10	70	130	170–179	60–59	110–119
210	3½	10	11	10	1	71	141	11	81	151	197–208	57–68	127–138
240	4	12	12	13	1	81	161	13	93	173	232–4	72–84	152–164
240	4	12	12	11	1	81	161	13	93	173	226–238	66–78	146–158
270	4½	13	14	13	1	91	181	14	104	194	253–267	73–87	163–177
300	5	15	15	16	1	101	201	16	116	216	290–5	90–105	190–205
300	5	15	15	14	1	101	201	16	116	216	282–297	82–97	182–197
$2p = 24$													
144	2	6	6	7	1	45	101	7	51	107	140–2	40–46	96–102
144	2	6	6	5	1	45	101	7	51	107	138–144	38–44	94–100
180	2½	7	8	7	1	56	126	8	63	133	171–179	46–54	116–124
216	3	9	9	10	1	67	15!	10	76	160	210–3	60–69	144–153
216	3	9	9	8	1	67	151	10	76	160	206–215	56–65	140–149
2Б2	3½	10	11	10	1	78	176	11	88	186	239–250	64–75	162–173
288	4	12	12	13	1	89	201	13	101	213	280–4	80–92	192–204
288	4	12	12	11	1	89	201	13	101	213	274–286	74–86	186–193
324	4½	13	14	13	1	100	226	14	113	239	307–321	82–96	208–222
360	5	15	15	16	1	111	251	16	126	265	350–5	100–115	240–255
360	5	15	15	14	1	111	251	16	126	266	342 357	92–107	232–247

Список литературы

1. Бабенко Д. А., Тепленко С. И.. Чибишев Л. Д. В помощь электрику–обмотчику асинхронных электродвигателей. М., "Энергия", 1965.
2. Виноградов Н. В. Производство электрических машин. М., "Энергия", 1970.
3. Зимин В. И., Каплан М. Я. и др. Обмотки электрических машин. М., "Энергия", 1970.
4. Кокорев А. С.. Наумов И. Н. Справочник молодого обмотчика электрических машин. М., "Высшая школа", 1964.

5. Лившиц–Гарик М. Обмотки машин переменного тока. М., Госэнергоиздат, 1959.
6. Рубо Л. Г. Пересчет и ремонт асинхронных электродвигателей мощностью до 100 кВт. М., "Госэнергоиздат", 1961.
7. Уманцев Р. Б. Конструкция и ремонт короткозамкнутых обмоток роторов крупных двигателей. М., "Энергия", 1967.

Оглавление

	стр.
1. Предисловие. Общие сведения	3
2. Схемы обмоток статоров	7
3 Схемы обмоток роторов	32
4. Схемы несимметричных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу	39
5. Схемы двухслойных обмоток с не равновитковыми катушками	49
Список литературы	58

Маршак Евсей Львович, Уманцев Рудольф Борисович

Схемы обмоток машин переменного тока
Редактор Г. Г. Родин
Редактор издательства Э. Я. Бранденбургская. Обложка художника П. П. Перевалова.
Технический редактор Г. Г. Самсонова. Корректор Е. Х. Горбунова.
Сдано в набор 19/VI/1973 г. Подписано к печати 17.01.1974 г. Т–02928
Формат $84\times108^{1}/_{32}$ Бумага типографская №2
Усл. печ. л. 5,04 Уч.–изд. л. 4,98
Тираж 18000 экз. Зак. 320 Цена 18 коп.
Издательство "Энергия". Москва, М–114. Шлюзовая наб., 10.
Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М–114, Шлюзовая наб, 10.